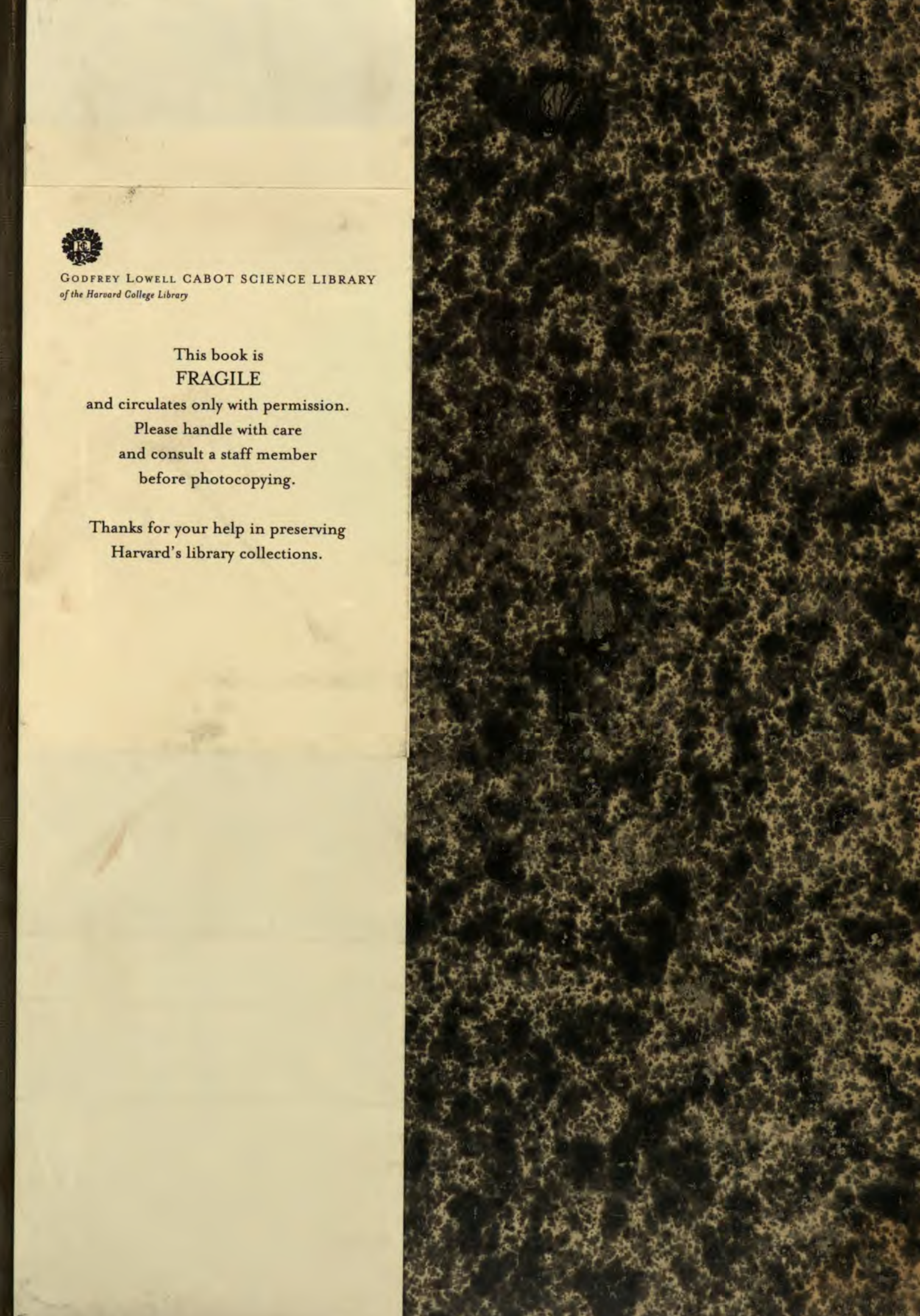
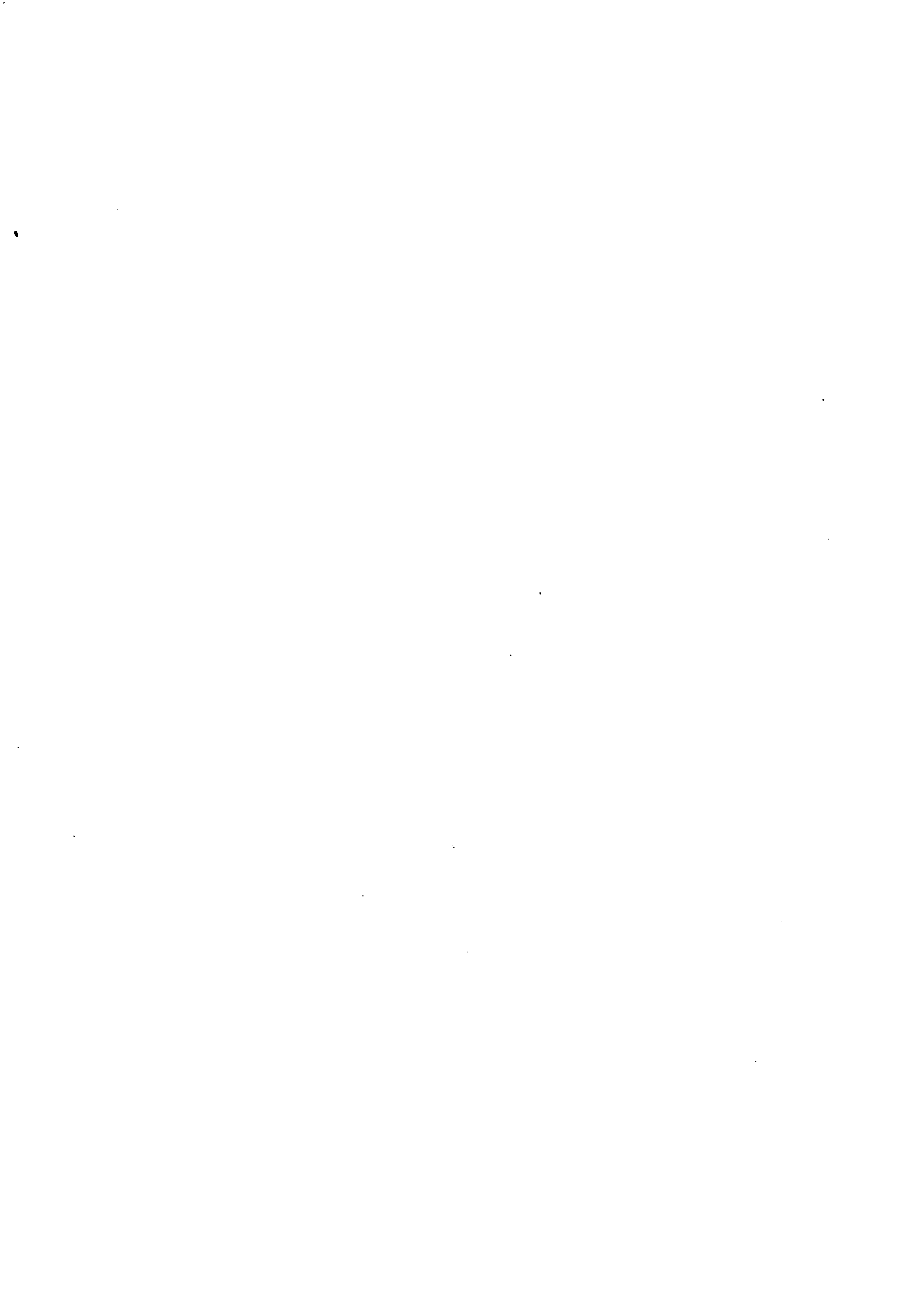






Graphodynamische Untersuchung einer Heusinger-Joy-Steuerung.

Ein Beitrag zur Erkenntnis der Bewegungsverhältnisse der Steuerungsgetriebe.

Von der Königl. Technischen Hochschule zu München

zur

Erlangung der Würde eines Doktors der technischen Wissenschaften

(Doktor-Ingenieurs)

genehmigte Dissertation.

Vorgelegt von:

Eduard Dafinger

Diplomingenieur und Assistent an der Königl. Technischen Hochschule zu München.

Referent: Prof. W. Lynen

Korreferent: Prof. Dr. L. Burmester.



BERLIN 1906

RICHARD DIETZE

(Verlag von Dinglers Polytechnischem Journal).



[illegible] suchung

[illegible] uerung;

[illegible] r Steuerungsgetriebe.

[illegible] München

[illegible] chen Wissenschaften

[illegible] n.

[illegible] schule zu München.

Berichtigungen.

---

1. Seite 9, rechte Hälfte, Zeile 9 von unten: lies: „der aus den Stangen IK, IL, MN, NO und dem Hilfsgetriebe besteht“ statt „der aus den Stangen IK, IL, MC, NO und dem Hilfsgetriebe besteht“.

2. Seite 13, rechte Hälfte, letzte Zeile: lies: „$M_{j''}$“ statt „$M_{j'}$“.

3. Seite 15, linke Hälfte: lies bei sämtlichen Integralzeichen: „$\int_0^l$“ statt „$\int_0^1$“.

4. Seite 16, linke Hälfte, Zeile 13 von unten: lies: „der Stein H“ statt „der Stein G“.

5. Seite 16, rechte Hälfte, Zeile 15 von oben: lies: „Schnittpunkt U der Richtung von K_0“ statt „Schnittpunkt U der Richtung von K^0“.

6. Seite 18, rechte Hälfte, Zeile 2 von unten: lies: „bekannten Richtungen von H_k und L_k“ statt „bekannten Richtungen von H_k und L“.

7. Seite 22, linke Hälfte, Zeile 13 von oben: lies: „die gesuchten Kräfte A_k und R_k geben“ statt „die gesuchten Kräfte A_k und B_k geben“.

8. Seite 22, rechte Hälfte, Zeile 11 von unten: lies: „auf die Richtung von K'_0“ statt „auf die Richtung von K_0“.

9. Seite 22, rechte Hälfte, Zeile 5 von unten: lies: „die beiden Komponenten H'^k und I'_k“ statt „die beiden Komponenten N'_k und I_k“.

10. Seite 23, linke Hälfte, Zeile 23 von oben: lies: „die Steinlagen H“ statt „die Steinlagen N“.

11. Seite 23, linke Hälfte, Zeile 26 von unten: lies: „die Punkte I, H, L, M und N“ statt „die Punkte I, N, L, M und N“.

12. Seite 23, linke Hälfte, Zeile 4 von unten: lies: „120 km/Std.“ statt „120 kg/Std.“

BERLIN 1906
RICHARD DIETZE
(Verlag von Dinglers Polytechnischem Journal).



Graphodynamische Untersuchung einer Heusinger-Joy-Steuerung.

Ein Beitrag zur Erkenntnis der Bewegungsverhältnisse der Steuerungsgetriebe.

Von der Königl. Technischen Hochschule zu München

zur

Erlangung der Würde eines Doktors der technischen Wissenschaften

(Doktor-Ingenieurs)

genehmigte Dissertation.

Vorgelegt von:

Eduard Dafinger

Diplomingenieur und Assistent an der Königl. Technischen Hochschule zu München.

Referent: Prof. W. Lynen

Korreferent: Prof. Dr. L. Burmester.



BERLIN 1906

RICHARD DIETZE

(Verlag von Dinglers Polytechnischem Journal).

Wenn man ein Steuerungsgetriebe auf seine Bewegungsverhältnisse untersucht, so bestimmt man für jeden einzelnen bewegten Steuerungsteil die Geschwindigkeiten und Beschleunigungen bei den verschiedenen Stellungen des Getriebes. Ihre praktische Bedeutung erhält die Untersuchung, wenn man diese Kenntnis der Bewegungen dazu benutzt, die dynamische Wirkung der bewegten Massen aufzusuchen. Wenngleich diese Aufgabe eine sehr dankbare wäre, insoweit ihre Lösung manche Unsicherheit in der Berechnung der Zapfen in den Gelenken und der Abmessungen der Stangen beseitigen würde, wird sie selten gemacht, da sie sehr umständlich und zeitraubend ist, und da auch die geringen Umlaufzahlen der Maschinen oder die geringen Massen der bewegten Teile sie nicht immer nötig machen. Diese letzteren Gründe treffen aber für die Lokomotivsteuerungen nicht zu. Denn gerade im Eisenbahnwesen zeigt sich das Bestreben, die Zuggeschwindigkeit zu erhöhen, was nur durch eine höhere Umlaufzahl der Lokomotivräder zu erreichen ist, da eine Vergrösserung des Triebräddurchmessers aus konstruktiven Gründen nicht mehr möglich ist. Es erscheint deshalb wünschenswert, die Bewegungsverhältnisse und die dynamische Wirkung des vorliegenden Steuerungsgetriebes zu kennen. Die Untersuchung hat auch eine allgemeine Bedeutung, da sich die Resultate auf die meisten Steuerungen der gleichen Gattung anwenden lassen. Denn, wenn für die gleiche Steuerung nur die Umlaufzahl des Kurbelzapfens eine andere wird, so würde das an den Resultaten nichts ändern; es wird nur der Masstab der gefundenen Werte einer Korrektur bedürfen. Aendern sich aber auch die Abmessungen der Steuerung, so ist doch im allgemeinen anzunehmen, dass die Verhältnisse der einzelnen Hebel- und Stangenlängen zu einander, somit auch die Verhältnisse ihrer Massen ziemlich die gleichen bleiben. Unter dieser Voraussetzung ist es nur nötig Geschwindigkeit, Beschleunigung und dynamische Wirkung für eine Kurbelstellung zu bestimmen, um dadurch den Masstab festzulegen, mit dessen Hilfe dann wiederum eine Benutzung der früheren für eine andere Steuerung gleicher Gattung gefundenen Werte gestattet ist und um dadurch Anhaltspunkte für die Beurteilung der neuen Steuerung zu gewinnen.

Die hier gewählte Steuerung ist prinzipiell eine *Heusinger*-Steuerung, deren Schwinge jedoch nicht in der üblichen Weise durch ein Exzenter, sondern von der Triebstange aus mittels Lenker und Gegenlenker angetrieben wird. Diese Bauart, welche der *Joy*schen ähnlich ist, wird häufig als *Heusinger-Joy*-Steuerung bezeichnet. Ihr geometrischer Zusammenhang ist aus Fig. 1 zu erkennen und ihre erste Ausführung findet sich bei den Schnellzugslokomotiven der französischen Westbahn. Die hier behandelte Steuerung ist die der $^2/_5$ gekuppelten Schnellzugslokomotive der bayerischen Pfalzbahnen, erbaut 1899 von der Lokomotivfabrik *Kraus* & *Co.* in München. (Vergl. Organ des Fortschritts des Eisenbahnwesens, Jahrg. 1899 S. 1.)

Die Steuerung führt bei einer Kurbeldrehung eine durch ihren geometrischen Zusammenhang eindeutig vorgeschriebene Bewegung gegenüber der Lokomotive aus. Die einzelnen Steuerungsglieder haben somit eine ganz bestimmte relative Geschwindigkeit und Beschleunigung, und üben ursächlich der letzteren auf die Gelenkpunkte des Getriebes ganz bestimmte Kräfte aus, die als Trägheitskräfte oder Massendrücke bezeichnet werden sollen. Geschwindigkeit, Beschleunigung und Trägheitskraft sollen im vorliegenden Fall für eine Bewegungsperiode, d. i. eine Kurbeldrehung, unter Zugrundelegung einiger notwendiger Annahmen ihrer Grösse und Richtung nach bestimmt werden. Die zu lösende Aufgabe gliedert sich somit in die drei folgenden Teile:

I. Bestimmung der Geschwindigkeit;

II. Bestimmung der Beschleunigung und

III. Bestimmung der von den bewegten Massen des ganzen Steuergetriebes herrührenden Trägheitskräfte.

Unter der Annahme konstanter Zuggeschwindigkeit werden relative Beschleunigung uud relative Trägheitskraft auch zugleich die absolute Beschleunigung und Trägheitskraft sein, während die absolute Geschwindigkeit die Resultierende aus der relativen und der Zuggeschwindigkeit sein muss. Hier sollen, wie schon erwähnt, nur die relativen Werte bestimmt werden; d. h. man könnte sich den Fall auch so denken, dass die Lokomotive selbst stehen bleibt und die Kurbel mit einer bestimmten Umlaufzahl rotiert. Im nachstehenden werden deshalb auch für relative Geschwindigkeit, Beschleunigung und Kraft kurzweg die Ausdrücke Geschwindigkeit, Beschleunigung und Kraft gebraucht.

Um ein genaues und vollständiges Bild zu erhalten über die Grösse und Aenderung der gesuchten Werte an einem der Steuerungsgelenkpunkte, muss man bei einer grösseren Anzahl Kurbelstellungen für jeden ausgezeichneten Punkt des Getriebes Geschwindigkeit, Beschleunigung und Trägheitskraft suchen und die erhaltenen Resultate in Tabellen oder Kurven sammeln. Nur dann ist es möglich mit ziemlicher Genauigkeit anzugeben, wann die im allgemeinen veränderlichen Grössen ein Maximum erreichen, dessen Kenntnis für die praktische Berechnung der Hebel- und Stangenabmessungen von Wichtigkeit ist. Die Tabellen und Kurven werden natürlich um so vollständiger und genauer, je mehr Kurbelstellungen man untersucht. In der vorliegenden Arbeit sollen Geschwindigkeit, Beschleunigung und Kraft für 16 verschiedene Kurbelstellungen bestimmt werden. In den Fig. 2—40 ist die Bestimmung dieser Werte für das ganze Steuergetriebe

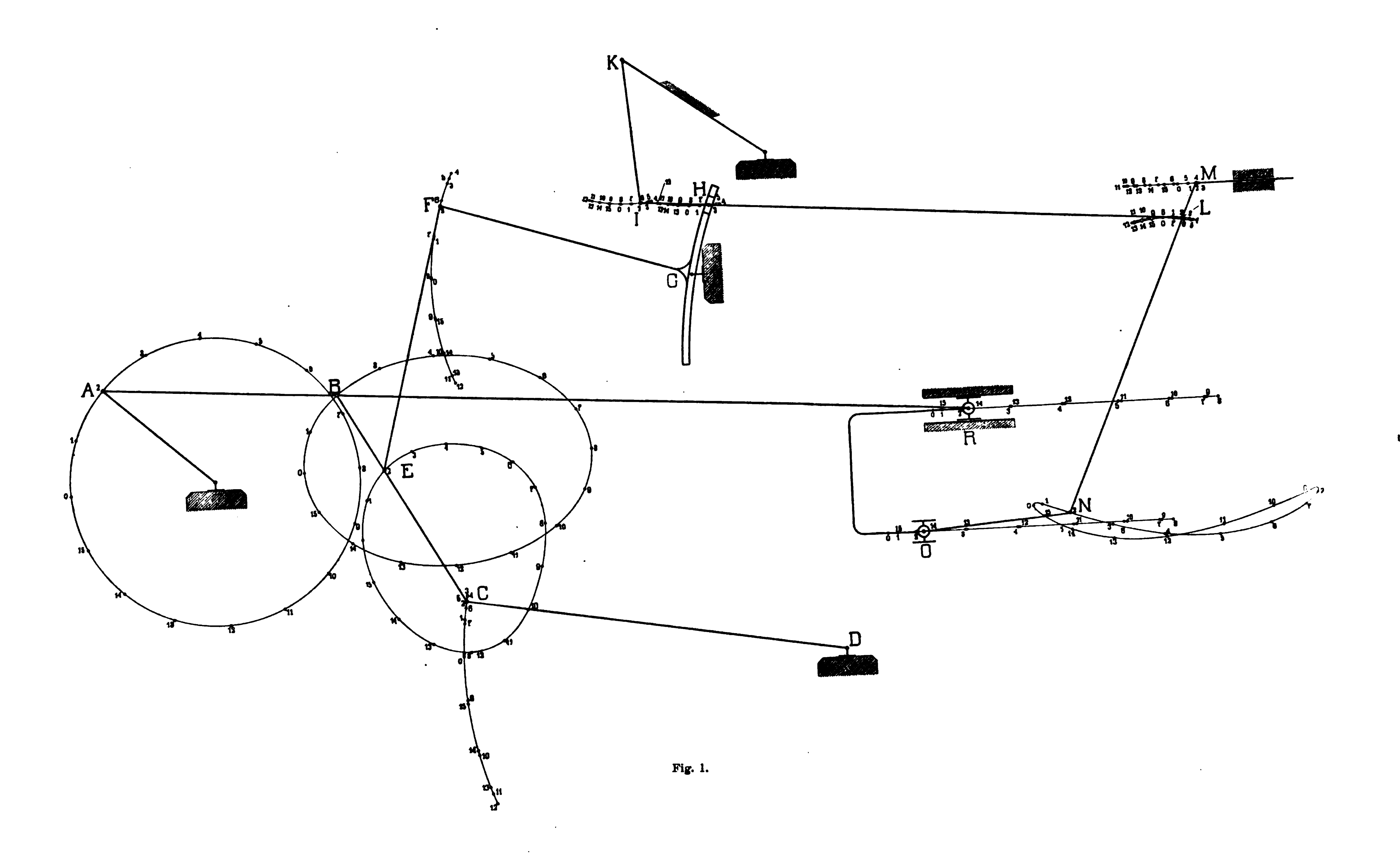


Fig. 1.

und den Kurbelmechanismus durchgeführt. Von diesen Figuren, welche der Erläuterung dienen, wird vor allem verlangt, dass sie nicht durch eine ungünstige Lage der einzelnen Linien, Schnittpunkte usw. das Verständnis erschweren. Dies zu erreichen ist aber nur möglich, wenn man auf einen folgerichtigen Zusammenhang der Einzelfiguren untereinander verzichtet und für jede die Hebel- und Stangenlagen, sowie die in den Getriebeteil, der durch die betreffende Figur behandelt werden soll, eingeleitete Bewegung oder Kraft ohne Rücksicht auf die vorangegangene Figur neu wählt.

I. *Bestimmung der Geschwindigkeiten.*

Bei der Annahme einer konstanten Zuggeschwindigkeit folgt für die Kurbel eine konstante Umlaufzahl und damit auch eine konstante Winkelgeschwindigkeit. Die Lokomotiven der Pfalzbahn, denen die hier behandelte Steuerung entnommen ist, sind gebaut unter der Annahme, dass sie eine Maximalgeschwindigkeit von 120 km i. d. Stunde erreichen sollen. Diese Annahme soll auch hier zugrunde gelegt werden und gibt bei einem Triebraddurchmesser von $D = 1980$ mm und einem Kurbelradius von $R = 285$ mm eine Kurbelzapfengeschwindigkeit von

$$A_v = \frac{120 \cdot 1000}{60 . 60} \cdot \frac{2 \cdot R}{D} =$$

$$= \frac{120000 \cdot 2 . 285}{3600 \cdot 1980} = 9{,}596 \text{ m/Sek.}$$

Die am Kurbelzapfen A eingeleitete Geschwindigkeit ist damit gegeben; die der übrigen ausgezeichneten Punkte soll in den nachfolgenden Figuren gesucht werden. Die Geschwindigkeit wird zweckmässig in einem solchen Massstab eingetragen, dass die Ausgangsgeschwindigkeit A_v gleich dem Kurbelradius der Zeichnung wird. Für die Aufsuchung der Geschwindigkeiten der Steuerungsteile ist es zuerst notwendig auf einige Lehrsätze und Bezeichnungen aus der Bewegungslehre hinzuweisen. Unter Pol versteht man den momentanen Drehpunkt eines Systems. Polstrahl und Geschwindigkeit stehen senkrecht aufeinander. Die auf dem Pol abgetragene, also um 90^0 gedrehte Geschwindigkeit wird als die lotrechte Geschwindigkeit eines Punktes bezeichnet. Die Geschwindigkeiten der Punkte eines bewegten Systems verhalten sich bekanntlich wie die Abstände der Systempunkte vom Pol. Im übrigen soll für die Bezeichnungsweise in den Figuren die von *Burmester* in seinem Lehrbuch befolgte durchgeführt werden.

Das ganze bewegte Getriebe kann man hinsichtlich der Geschwindigkeitsbestimmung in zwei Teile trennen, deren erster den Kurbelmechanismus und die Stangen BC, CD, EF, FG und die Kulisse umfasst. Diese Getriebeteile erhalten nur von einer Seite, von der Kurbel aus eine Bewegung eingeleitet und ist die Bestimmung ihrer Geschwindigkeiten in den Fig. 2—5 erläutert.

Fig. 2. Gegeben ist die Kurbelzapfengeschwindigkeit A_v und gesucht soll die Kreuzkopfgeschwindigkeit R_v werden. Es ist dann AQ die lotrechte Geschwindigkeit des Kurbelzapfens und P der Pol der Stange AR; denn der Polstrahl von A ist die verlängerte Kurbel und der Polstrahl von R muss das Lot in R auf der Kreuzkopfgleitbahn sein. Damit ist die Richtung der Geschwindigkeit R_v gegeben, da sie nach obigem Lehrsatz senkrecht auf dem Polstrahl PR und als Geschwindigkeit eines Punktes des Systems AR den gleichen Drehsinn des Systems um den Pol wie die schon bekannte Geschwindigkeit A_v ergeben muss. Die Grösse von R_v bestimmt sich nach der Gleichung, die sich aus der wechselseitigen Beziehung der Geschwindigkeiten zweier Punkte eines Systems zu ihren Polstrahlen ergibt. Es ist:

$$R_v : A_v = RP : AP.$$

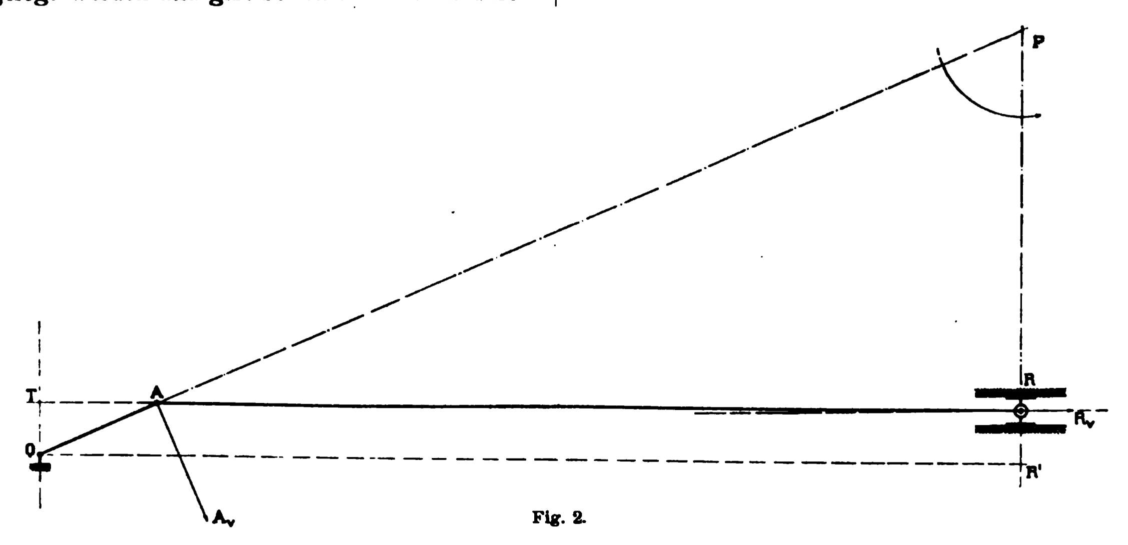


Fig. 2.

Diese Gleichung kann graphisch gelöst werden, wenn man A_v auf dem Polstrahl abträgt; d. h. die lotrechte Geschwindigkeit einzeichnet und durch den Endpunkt derselben eine parallele Gerade zu AR zieht. Diese Parallele muss dann auf dem Polstrahl von R die lotrechte Geschwindigkeit von R abschneiden. Da A_v gleich dem Kurbelradius gezeichnet wurde, ist AQ die lotrechte Geschwindigkeit von A und muss RR' die lotrechte Geschwindigkeit von R sein. Damit ist R_v der Grösse und Richtung nach bestimmt.

Aus der Figur lässt sich weiter eine sehr einfache zweite Konstruktion der Kreuzkopfgeschwindigkeit ableiten. RA wird über A hinaus verlängert bis zum Schnitt mit dem Lote in Q auf der Kreuzkopfgleitbahn. $QTRR'$ ist dann ein Parallelogramm und folglich $QT = RR'$, d. h. QT ist der Grösse nach die gesuchte Kreuzkopfgeschwindigkeit R_v. Ihre Richtung ist wie oben zu bestimmen.

Fig. 3. Nachdem die Geschwindigkeiten A_v und R_v bekannt sind, kann die Geschwindigkeit eines auf der Triebstange AR liegenden Punktes B bestimmt werden. Der Pol des bewegten Systems AR ist aus Fig. 2 schon bekannt, und da B diesem System angehört, muss PB der Polstrahl von B sein. Man zieht durch den Endpunkt Q der lotrechten Geschwindigkeit von A eine parallele Gerade zur Triebstange AR, die auf dem Polstrahl von B die lotrechte Geschwindigkeit BB' des Punktes B abschneidet. Die Richtung der Geschwindigkeit von B muss senkrecht zum Polstrahl sein und dem durch A_v und R_v gegebenen Drehsinn des Systems um den Pol P entsprechen.

In den meisten Fällen wird für das System $A R$ der Pol sehr entfernt von der Zeichnung liegen, was dann die oben erwähnte Auffindung des Polstrahls von B durch einfaches Verbinden des Punktes B mit dem Pol unmöglich macht. Für diesen Fall wird zur Konstruktion des Polstrahls $B P$ die Tatsache benutzt, dass jede zu $A R$ parallele Gerade von den drei Polstrahlen $A P$, $B P$ und $R P$ im gleichen Verhältnis geteilt wird wie $A R$ selbst durch die Punkte A, B und R. Es muss sich deshalb verhalten:

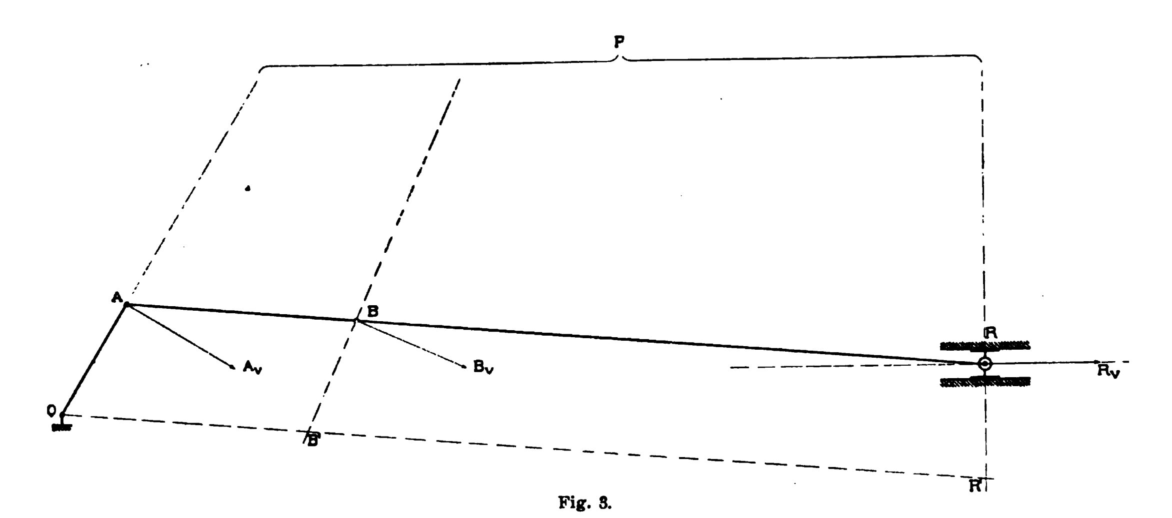


Fig. 3.

$$A B : B R = Q B' : B' R'.$$

Teilt man somit $Q R'$ in diesem bekannten Verhältnis, so ist der dadurch gefundene Teilpunkt B' zugleich der Endpunkt der lotrechten Geschwindigkeit von B. Die Richtung von B_v bestimmt sich wieder wie oben.

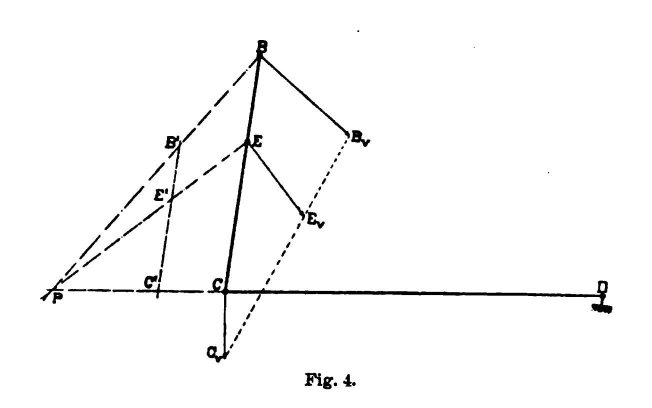


Fig. 4.

Fig. 4. Gegeben ist die Geschwindigkeit des Punktes B; gesucht werden die Geschwindigkeiten der Punkte C und E. Punkt E liegt auf der geometrischen Verbindungslinie von B mit C. Zuerst ist der Pol des bewegten Systems $B E C$ aufzusuchen. Der Polstrahl von B ist schon aus Fig. 3 bekannt und der von C ist der Hebel $C D$ selbst. Der Schnittpunkt P dieser beiden Polstrahlen ist der gesuchte Pol, der mit E verbunden wird. $P E$ ist dann der Polstrahl von E. Man zieht durch den Endpunkt B', der lotrechten Geschwindigkeit von B, eine Parallele zu $B C$, und diese wird auf $P E$ und $P C$ die lotrechten Geschwindigkeiten $E E'$ und $C C'$ abschneiden. Diese Geschwindigkeiten werden senkrecht zu ihren Polstrahlen so angetragen, dass sie dem durch B_v gegebenen Drehsinn des Systems um P entsprechen.

Bei richtiger Durchführung der Konstruktion müssen die Endpunkte von B_v, E_v und C_v auf einer Geraden liegen, die durch den Endpunkt von E_v im selben Verhältnis geteilt wird wie $C B$ durch den Punkt E. Umgekehrt könnte auch diese Kontrolle zur Aufsuchung von E_v bei gegebenem B_v und schon bestimmten C_v benutzt werden.

Fig. 5. Gegeben ist die Geschwindigkeit des Punktes E; gesucht wird die Geschwindigkeit des Punktes F. Der Hebel $F G$ dreht sich um den festen Punkt G. Der Pol des Systems $E F$ ist der Schnittpunkt der beiden Polstrahlen von E und F. Ersterer ist schon aus Fig. 4 bekannt und der letztere kann nur $F G$ selbst sein. $E E'$ ist die lotrechte Geschwindigkeit von E. Durch ihren Endpunkt E' wird eine zu $E F$ parallele Gerade gezogen, die den Polstrahl von F in F' schneidet. $F F'$ ist dann die lotrechte Geschwindigkeit des Punktes F, die um 90° so verdreht werden muss, dass sie mit E_v den gleichen Drehsinn des Systems $E F$ um P ergibt. F_v ist der Grösse und Richtung nach die gesuchte Geschwindigkeit des Punktes F.

Die weiteren Steuerungsteile (s. Fig, 1), bestehend aus der Hängestange $K I$, der Schubstange $I L$, der Mitnehmerstange $N O$, dem Voreilhebel $M N$ und schliesslich der Schieberstange mit Schieber stellen ein Getriebe vor, bei welchem ein doppelter Bewegungs-

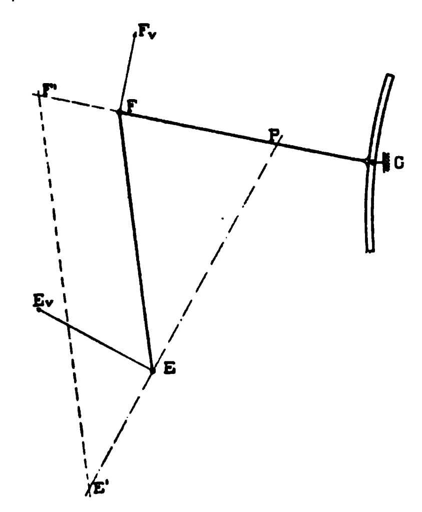


Fig. 5.

antrieb stattfindet; nämlich der Antrieb, der durch den mit dem Kreuzkopf fest verbundenen Punkte O erfolgt und der Antrieb, der dem Getriebe durch die Kulisse erteilt wird. Nach *Grove* (Handbuch für spezielle Eisenbahntechnik von *Heusinger*, II. Auflage, Band 3, Seite 612) kann man die Bestimmung der Geschwindigkeiten hier in der Weise lösen, dass man jede Bewegung für sich selbst behandelt. Man denke sich vorerst eine der Bewegungen ausgeschaltet, z. B. den Punkt O festgehalten und bestimmt

die Geschwindigkeiten der Steuerungsteile, die von der Bewegung der Kulisse herrühren. Hernach denke man sich die Kulisse festgehalten und bestimmt die Geschwindigkeiten im Getriebe, die von dem Antrieb, der durch den Kreuzkopf erfolgt, herrühren.

Dadurch erhält man an jedem Punkte zwei Geschwindigkeiten, deren Resultierende die Geschwindigkeit des betreffenden Punktes ist für den Fall, dass beide Bewegungen gleichzeitig erfolgen.[1]) Im Gegensatz zum ersten Teil des ganzen Steuerungsgetriebes, umfassend die Stangen BC, CD, EF und die Kulisse, bei dem von der Kurbel ausgehend die Bewegung jedes Teiles einzeln in einer Figur bestimmt wurde, wird es hier bei dem zweiten Teil des Getriebes, umfassend die Stangen KI, IL, MN, NO und die Schieberstange mit Schieber, nötig, wegen der Aufsuchung der verschiedenen Polstrahlen die sämtlichen Stangen auf einmal zu behandeln.

Fig. 6. Gegeben ist die Geschwindigkeit F_v des Hebels, der die Kulisse bewegt. Es sollen die Geschwindigkeiten der Punkte H, I, L, M und N gesucht werden unter der vorläufigen Annahme, dass der Kreuzkopfpunkt O sich in Ruhe befindet, also zum festen Punkt wird, um den sich die Mitnehmerstange NO dreht. Ausser diesem Hebel und der um K drehbaren Aufhängestange KI sind noch die bewegten Systeme IHL und MLN vorhanden, deren Pole P_2 und P_1 sich wie folgt bestimmen. Der Pol der Stange MN ist P_1 als der Schnittpunkt des Polstrahles von N, das ist NO, und des Polstrahls von M, das ist das Lot in M auf der Bahn des gerade geführten Punktes M. P_1 mit L verbunden gibt P_1L als den Polstrahl des Punktes L, der dem System MN angehört. Von dem System IHL sind die beiden Polstrahlen von I und L bekannt. Ersterer ist KI und letzterer die oben gefundene Linie P_1L. P_2 ist der Schnittpunkt dieser beiden Polstrahlen und somit der Pol des bewegten Systems IHL. P_2 wird dazu benutzt, um den Polstrahl von H anzugeben; doch bringt die Getriebeanordnung es mit sich, dass P_2 sehr weit hinausfällt. Man bestimmt deshalb P_2H in der Weise, dass man eine zu IL parallele Gerade zwischen den Polstrahlen IP_2 und LP_2 im gleichen Verhältnis teilt, in welchem der Punkt H die Stange IL teilt. Die Verbindungslinie dieses Teilpunktes mit H ist dann der gesuchte Polstrahl von H.

Bei der Bestimmung der Geschwindigkeiten wird zuerst die Geschwindigkeit des Steines H gesucht. Der Punkt H erhält seine Bewegung von der Kulisse; er wird sich also mit ihr und — da er frei beweglich in derselben gleiten kann — auch auf ihr bewegen. Gemäss der ersteren Bewegung sei seine Geschwindigkeit H_v' und gemäss der letzteren H''_v. H'_v ist leicht zu bestimmen, da F_v bekannt und

$$H'_v = F_v \cdot \frac{GH}{GF},$$

wobei unter GH nicht der Kulissenbogen, sondern die Sehne zu verstehen ist. H'_v muss senkrecht auf GH stehen und mit F_v im gleichen Sinne um G drehen. Die Geschwindigkeit H''_v ist ihrer Grösse nach noch unbekannt. Man kennt nur ihre Richtung, das ist die Tangente an die Kulissenkrümmung im Punkte H. Wird im Endpunkte von H'_v eine parallele Gerade zu dieser Tangente gezogen, so erhält man einen geometrischen Ort für H_v', die Geschwindigkeit von H. Ferner ist auch noch die Richtung von H_v' bekannt; denn diese Geschwindigkeit muss senkrecht auf dem Polstrahl P_2H stehen. Auf dieser Richtung von H_v' schneidet der oben erwähnte geometrische Ort die Geschwindigkeit H_v' der Grösse und der Richtung nach ab.

$HH' = H_v'$ auf dem Polstrahl P_2H abgetragen ist die lotrechte Geschwindigkeit des Punktes H. Eine durch H' zu IL gezogene Parallele schneidet auf den Polstrahlen von I und L die lotrechten Geschwindigkeiten II' und

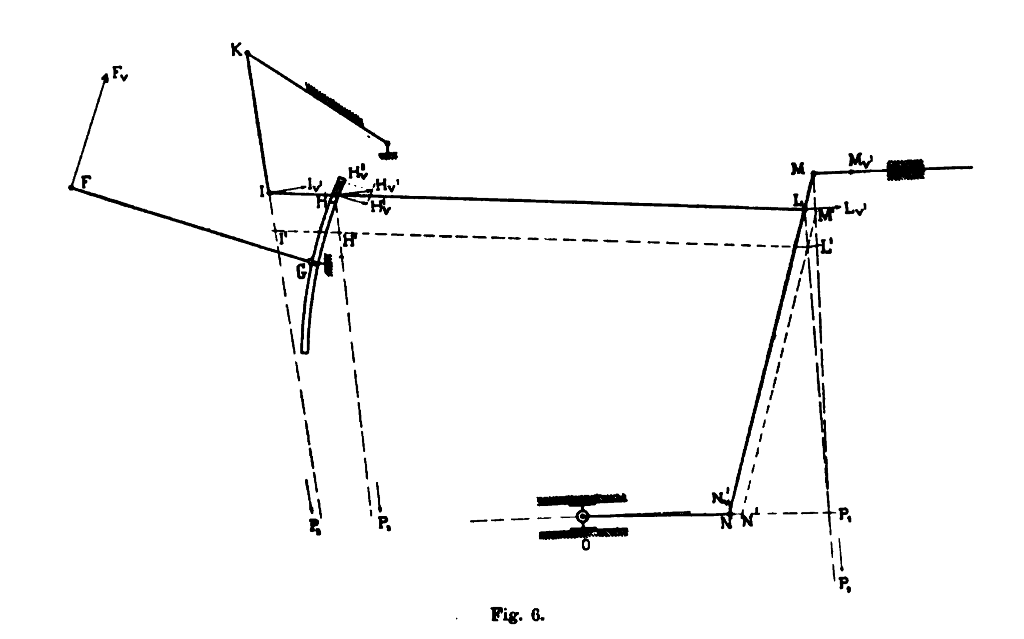


Fig. 6.

[1]) Diese Zerlegung in zwei Bewegungen, die dann wieder die Zusammensetzung aller betreffenden Geschwindigkeiten aus je zwei Komponenten erfordert, kann vermieden werden und zwar in der Weise, dass man die lotrechte Geschwindigkeit von L als Schnittpunkt von zwei geometrischen Oertern bestimmt.

Betrachtet man zuerst das Getriebe $KIHTG$ für sich, so ist in demselben nur die lotrechte Geschwindigkeit TT' von T gegeben. Bekanntlich ist dann der geometrische Ort für die lotrechte Geschwindigkeit von L eine Gerade, deren Bestimmung in der Weise erfolgt, dass auf dem bekannten Polstrahl IK zwei vorläufige beliebige Pole der Stange IL angenommen werden. Für jeden dieser vorläufigen Pole kann eine lotrechte Geschwindigkeit von L bestimmt werden. Die Verbindungslinie der Endpunkte dieser so erhaltenen lotrechten Geschwindigkeiten ist ein geometrischer Ort für die wirkliche lotrechte Geschwindigkeit LL' von L. Dieselbe Konstruktion kann auch bei dem Getriebe ONM angewendet werden, bei welchem die lotrechte Geschwindigkeit von O gegeben ist. Dadurch wird ein weiterer geometrischer Ort für die lotrechte Geschwindigkeit von L erhalten. Mit der Bestimmung der lotrechten Geschwindigkeit von L ist auch der Polstrahl von L gegeben und die Konstruktion der Geschwindigkeiten der übrigen Gelenkpunkte bietet keine Schwierigkeiten mehr.

LL' der Punkte I und L ab. Diese werden senkrecht zu den Polstrahlen so angetragen, dass sie der durch $H_{v'}$ gegebenen Drehrichtung des Systems IL um den Pol P_2 entsprechen. Durch L' wird ferner eine parallele Gerade zu MN gezogen, die auf MP_1 und NP_1 die lotrechten Geschwindigkeiten MM' und NN' abschneidet. Diese letzteren senkrecht zu ihren Polstrahlen und unter Berücksichtigung des durch $L_{v'}$ gegebenen Drehsinn des Systems MN um P_1 eingetragen, geben die gesuchten Geschwindigkeiten $M_{v'}$ und $N_{v'}$.

bestimmen sich wie folgt. Der Punkt I dreht sich um K und der Punkt H um T; somit sind KI und TH die Polstrahlen von I und H. Der Pol P_2 des Systems IHL ist dann der Schnittpunkt von KI mit TH, und P_2L muss der Polstrahl des Punktes L sein. M wird als Punkt der Schieberstange gerade geführt; sein Polstrahl ist somit ein Lot in M auf der Bewegungsrichtung. Der Schnittpunkt dieses Lotes mit dem Polstrahl P_2L gibt in P_1 den Pol des bewegten Systems MLN. P_1N ist dann der Polstrahl des Punktes N. Schliesslich wäre noch der Pol-

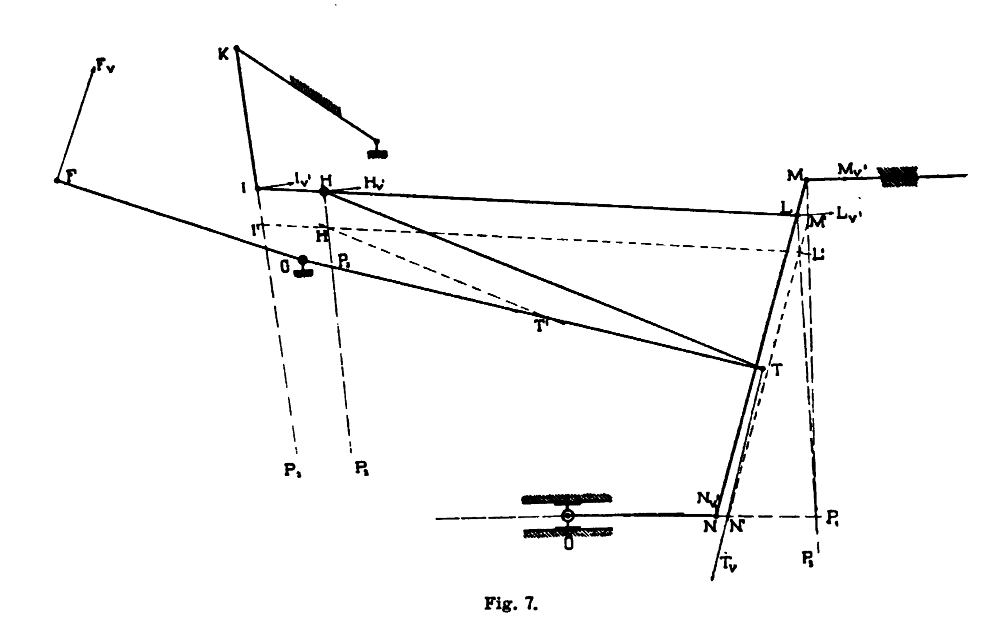


Fig. 7.

strahl des Punktes O anzugeben, der ein Lot in O auf der Kreuzkopfgleitbahn sein muss.

Die Geschwindigkeit $O_v = R_v$ ist bekannt und wird auf dem Polstrahl von O abgetragen. Durch den End-

Fig. 7. Die in Fig. 6 betätigte Aufsuchung der Geschwindigkeit $H_{v'}$ kann auch noch in anderer Weise geschehen. Man ersetzt die Kulisse durch ein Glied HT, welches im Krümmungsmittelpunkt T der Kulisse mit dem Gliede FGT und in H mit dem Gliede IL drehbar verbunden ist. Dadurch ist der Punkt H gezwungen, genau dieselbe Bewegung auszuführen, als ob er durch die Kulisse geführt würde. Die Geschwindigkeit T_v des nunmehrigen Gelenkpunktes T ist senkrecht auf GT und bestimmt sich ihrer Grösse nach aus der Gleichung:

$$T_v = F_v \cdot \frac{GT}{GF}.$$

Der Polstrahl von T ist der um G drehbare Hebel GT und der Polstrahl von H ist schon aus Fig. 6 bekannt. Wird T_v auf GT abgetragen, so hat man in TT' die lotrechte Geschwindigkeit von T, durch deren Endpunkt T' eine zu TH parallele Gerade gezogen wird. Diese schneidet auf dem Polstrahl von H die lotrechte Geschwindigkeit HH' ab. Die übrigen Geschwindigkeiten $I_{v'}$, $L_{v'}$, $M_{v'}$ und $N_{v'}$ werden wie in Fig. 6 gefunden.

Die zuletzt durchgeführte Aufsuchung von $H_{v'}$ ist umständlicher als die zuerst in Fig. 6 gegebene, da ein neues Hilfsgetriebe eingeschaltet werden muss. Sie ist hier vorzunehmen, da bei der späteren Bestimmung der Beschleunigungen die Einführung des Hilfsgetriebes nötig wird.

Fig. 8. Gegeben ist die Geschwindigkeit des mit dem Kreuzkopf R fest verbundenen Punktes O. Es sollen die Geschwindigkeiten der Punkte I, H, L, M und N gesucht werden unter der Annahme, dass die dem Getriebe durch die Kulisse erteilte Bewegung $=$ Null ist. Man denkt sich für einen Moment die Kulisse festgehalten und in O nur die Kreuzkopfbewegung eingeleitet. Bei Einführung des in Fig. 7 erläuterten Hilfsgetriebes würde dadurch T ein fester Punkt werden.

Die Pole der bewegten Systeme NLM und IHL

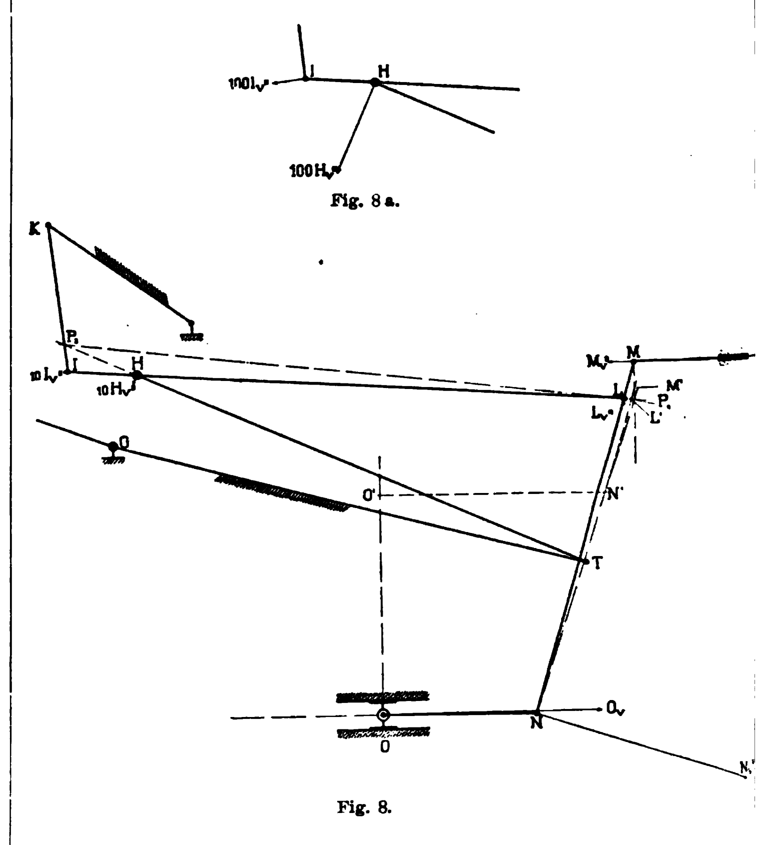


Fig. 8 a.

Fig. 8.

punkt O' der lotrechten Geschwindigkeit OO' wird eine zu NO parallele Gerade gezogen, die auf P_1N die lotrechte Geschwindigkeit NN' des Punktes N abschneidet.

Zieht man ferner durch N' eine Parallele zu NM, so schneidet diese auf den Polstrahlen von L und M die lotrechten Geschwindigkeiten LL' und MM' der Punkte L und M ab, Eine weitere zu IL parallele Gerade durch L' würde auf IP_2 und HP_2 die lotrechten Geschwindigkeiten von I und H geben. Die Anordnung des Getriebes bringt es aber mit sich, dass diese Werte bei allen Kurbelstellungen so klein werden, dass eine rechnerische Bestimmung der graphischen vorzuziehen ist. Man berechnet $I_{v''}$ und $H_{v''}$ aus den Gleichungen

$$I_{v''} = L_{v''} \cdot \frac{IP_2}{LP_2} \text{ und } H_{v''} = L_{v''} \cdot \frac{HP_2}{LP_2}.$$

Der Pol P_2 ist stets zugänglich, weshalb die Werte von IP_2, HP_2 und LP_2 aus der Zeichnung entnommen werden können. In Fig. 8a sind diese kleinen Geschwindigkeiten in hundertfacher Vergrösserung eingetragen, da sie in der Hauptfigur schwer erkennbar sind.

Aus den lotrechten Geschwindigkeiten werden, wie in den vorhergegangenen Figuren, die gerichteten Geschwindigkeiten wieder durch Verdrehen der lotrechten

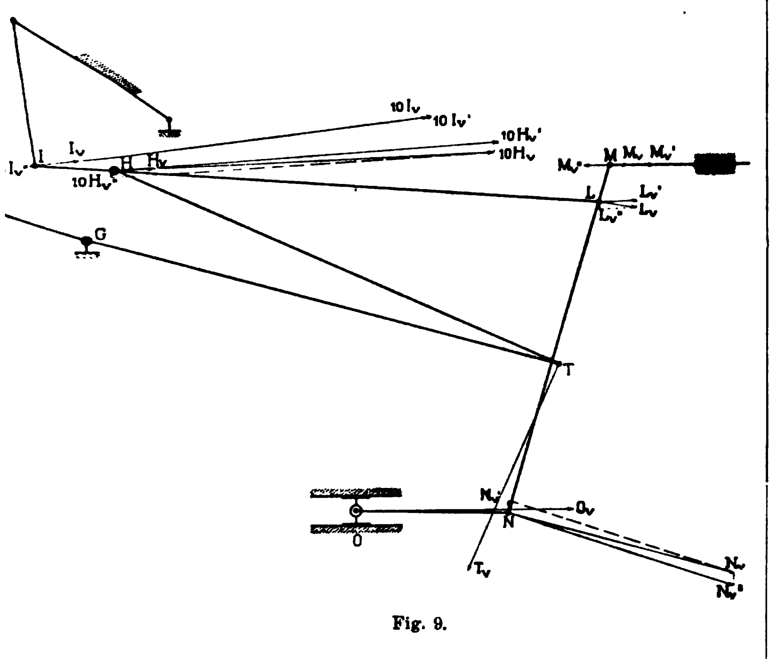


Fig. 9.

um 90 ⁰ gefunden. Die gesuchten Geschwindigkeiten der Punkte I, H, L, M und N sind dann $I_{v''}$, $H_{v''}$, $L_{v''}$, $M_{v'}$ und $N_{v''}$.

Fig. 9. Die in Fig. 7 und 8 gefundenen Geschwindigkeiten der Gelenkpunkte I, H, L, M und N sind, wie oben dargelegt, nur Komponenten der wirklichen Geschwindigkeiten. In Fig. 9 sind diese Komponenten zu ihren Resultierenden zusammengesetzt, die dann ihrer Grösse und Richtung nach die Geschwindigkeiten der betreffenden Punkte darstellen, wenn beide Antriebsbewegungen durch Kulisse und Kreuzkopf gleichzeitig erfolgen. Wegen der Kleinheit der Werte von $I_{v''}$ und $H_{v''}$ sind dieselben auch in der Fig. 9 zehnmal vergrössert eingezeichnet. Es ist I_v die Geschwindigkeit des Punktes I, H_v die Geschwindigkeit des Steins H, L_v die Geschwindigkeit des Punktes L, M_v die Geschwindigkeit des Punktes M und N_v die Geschwindigkeit des Punktes N.

Damit wäre der erste Teil der Aufgabe gelöst. Auf Grund der obigen Erläuterungen ist es möglich, für jede beliebige Kurbelstellung die Geschwindigkeit von jedem Punkte des Steuerungsgetriebes anzugeben; d. h. ihre Grösse und Richtung zu bestimmen, und somit Grundlagen zu gewinnen, auf denen die Beschleunigungen der Punkte und anschliessend die Trägheitskräfte der Getriebeteile aufgesucht werden können.

II. *Bestimmung der Beschleunigungen.*

Die Beschleunigung gibt die Aenderung der Geschwindigkeit an. Sie lässt sich geometrisch in zwei Richtungen zerlegen und zwar in eine Komponente in Richtung der Geschwindigkeit und in eine Komponente senkrecht dazu. Die erstere wird bezeichnet als Tangentialbeschleunigung und die letztere als Normalbeschleunigung. Die Tangentialbeschleunigung ist von der Aenderung der Geschwindigkeitsrichtung unabhängig; sie gibt nur die Aenderung der Geschwindigkeit ihrer Grösse nach an. Die Normalbeschleunigung jedoch gibt die Aenderung der Geschwindigkeitsrichtung; wird also sowohl von der momentanen Geschwindigkeitsgrösse, als auch von der Wegkrümmung des bewegten Punktes abhängen. Bezeichnet v die Geschwindigkeit eines Punktes und r den Krümmungshalbmesser der Bahn des Punktes, dann ist die Normalbeschleunigung

$$j_n = v^2 : r$$

Zur Durchführung der vorliegenden Aufgabe wurde konstante Kurbelzapfengeschwindigkeit angenommen, woraus folgt, dass die Tangentialbeschleunigung des Kurbelzapfens $j_t = 0$ wird. Die Normalbeschleunigung desselben berechnet sich aus obiger Formel zu

$$j_n = v^2 : r = (9{,}596)^2 : 0{,}285 = 323{,}1 \text{ m/Sek.}^2.$$

Da die Tangentialbeschleunigung j_t des Punktes $A = 0$ ist, muss die gefundene Normalbeschleunigung auch zugleich die resultierende Beschleunigung sein.

$$j_n = j = 323{,}1 \text{ m/Sek.}^2.$$

Die Tangentialbeschleunigung eines Punktes kann gleich und entgegengesetzt der Geschwindigkeit desselben gerichtet sein. Im ersteren Fall bedeutet sie ein Wachsen, und im letzteren ein Abnehmen der Geschwindigkeit. Die Normalbeschleunigung ist stets dem Krümmungsmittelpunkt der Bahn zu gerichtet. Die graphische Konstruktion derselben nach obiger Gleichung ist in der folgenden Figur angegeben.

Fig. 10. AB ist ein bewegtes System, das sich so bewegt, dass der Punkt B die momentane Geschwindigkeit B_v besitzt, und dass der Krümmungsmittelpunkt der Bahn, die B augenblicklich beschreibt, der Punkt A ist. Es ist dann AB der Krümmungshalbmesser. Es soll die Normalbeschleunigung des Punktes B bestimmt werden. Man verbindet den Endpunkt von B_v mit A und errichtet

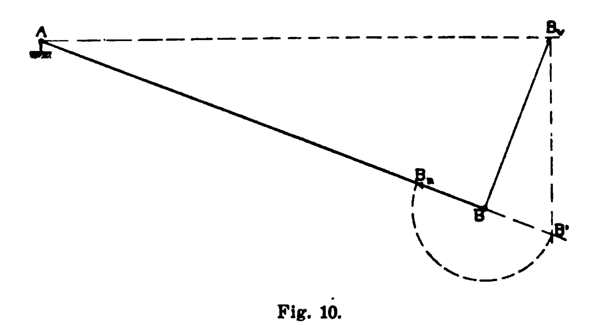


Fig. 10.

in demselben ein Lot auf $B_v A$. Dieses Lot schneidet die Normalbeschleunigung von B auf der Verlängerung des Krümmungshalbmessers ihrer Grösse nach ab. Denn es ergibt sich aus der Aehnlichkeit der Dreiecke $A B B_v$ und $B B_v B'$ die Proportion:

$$AB : BB_v = BB_v : BB'$$
$$BB' = (BB_v)^2 : AB.$$

Da BB_v die Geschwindigkeit und AB der Krümmungshalbmesser ist, muss nach der Gleichung

$$j_n = v^2 : r$$

$B B'$ die Normalbeschleunigung sein. Diese ist stets dem Krümmungsmittelpunkt zu gerichtet, weshalb sie von B nach A hin aufgetragen werden muss, um sie in der Strecke $B B_n$ ihrer Grösse und Richtung nach zu erhalten.

Wendet man diese Konstruktion auf die Bestimmung der Normalbeschleunigung des Kurbelzapfens A an, so wird diese — da A_v gleich dem Kurbelradius eingezeichnet wurde — ebenfalls gleich dem Kurbelradius. Damit ist der Masstab für die graphisch als Strecken dargestellten Beschleunigungen festgelegt. Er wird derart, dass 1 mm der Zeichnung $= 323{,}1 : Q A$ m/Sek.^{2} ist, wobei $Q A$ die Länge des Kurbelradius aus der Zeichnung in mm ist.

Die Konstruktion der Beschleunigung eines zwangläufig bewegten Punktes soll zuerst in den folgenden Fig. 11—14 an allgemeinen Fällen erläutert, und die daraus abgeleiteten Regeln sollen auf die vorliegende Steuerung angewendet werden.

Fig. 11. Im Getriebe $A B C D E$ sind A und E feste Punkte, um die die Stangen $A B$ und $D E$ sich drehen. Gegeben sind die Beschleunigungen B_j und D_j der Punkte B und D, sowie die dadurch auch bestimmten Geschwindigkeiten B_v, D_v und C_v der Punkte B, D und C. Die Beschleunigung C_j des Punktes C soll gesucht werden.

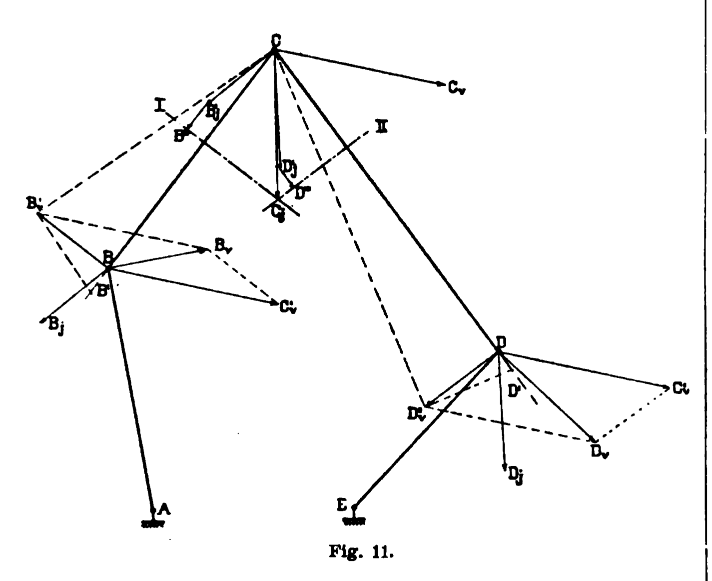


Fig. 11.

Nach *Burmester* ist zuerst die Relativgeschwindigkeit des Punktes C um B zu bestimmen. Im Interesse der Deutlichkeit der Figur ist es vorzuziehen, die Relativgeschwindigkeit des Punktes B um C zu suchen, da diese ihrer Grösse nach gleich der von C um B sein muss. Man trägt C_v parallel an B als C'_v an und bestimmt eine auf $B C$ senkrecht stehende Geschwindigkeit B'_v so, dass diese und C'_v als Resultierende die Geschwindigkeit B_v ergeben. B'_v ist die Relativgeschwindigkeit von B um C und — ihrer Grösse aber nicht dem Richtungssinn nach — die Relativgeschwindigkeit von C um B. Nach Fig. 10 wird die Normalbeschleunigung der Relativbewegung bestimmt. Diese ist der Grösse nach $B B'$. Ihre Richtung muss von dem bewegten Punkte C nach dem Drehpunkt A hin sein. Man trägt die Beschleunigung B_j an dem Punkte C parallel an und fügt daran die Normalbeschleunigung der Relativbewegung des Punktes C um B. Durch den Endpunkt dieses Linienzuges $C B'_j B'''$ wird ein Lot auf $C B$ gefällt, das der erste geometrische Ort I für die gesuchte Beschleunigung des Punktes C sein muss. Wird dieselbe Konstruktion von D aus durchgeführt, so erhält man in dem Lote II auf $C D$ den zweiten geometrischen Ort für C_j. Die Verbindungslinie des Schnittpunktes von I und II mit dem Punkte C ist die gesuchte Beschleunigung des Punktes C der Grösse und Richtung nach.

Fig. 12. In der vorigen Figur ist die Beschleunigung des Punktes C aufgesucht worden. Es soll untersucht werden, welche Veränderung diese Beschleunigung erleidet, wenn dem Punkte B eine zusätzliche Tangentialbeschleunigung B_t erteilt wird. An dem Punkte B wird die Tangentialbeschleunigung B_t sich mit der Beschleunigung B_j zur Resultierenden B'_j geometrisch addieren, und da die Beschleunigung von B an C parallel angetragen wird, muss B_t auch an dem Linienzug $C B_j' B'''$ noch der Grösse und Richtung nach angehängt werden.

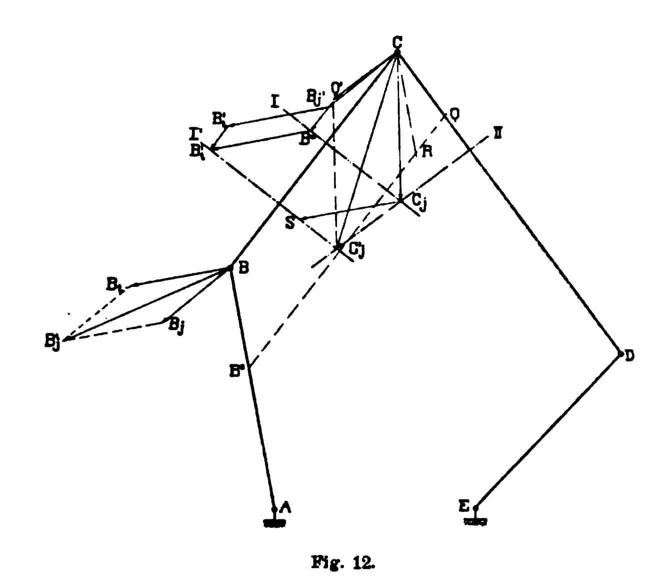


Fig. 12.

Der geometrische Ort I rückt nach I' und die Beschleunigung von C wird C'_j. Es werde nun B_t auf dem Polstrahl von B, auf $B A$ abgetragen und durch den Endpunkt B'' eine parallele Gerade zu $C B$ gezogen. Diese schneidet auf $C D$ die Strecke $C Q$ ab. Ferner sei noch $C R$ parallel $B A$ und $C_j S$ parallel $B''' B'_t$ gezogen.

Dann folgt aus der Kongruenz der Dreieke $C Q R$ und $C_j C'_j S$, dass $C Q = C_j C'_j$ ist. Aus diesem Ergebnis lässt sich folgende Konstruktion für die Beschleunigung C'_j ableiten. Die zusätzliche Tangentialbeschleunigung B_t wird auf dem Polstrahl abgetragen und durch den so erhaltenen Punkt B'' eine parallele Gerade zu $B C$ gezogen. Diese schneidet auf $C D$ die Strecke $C Q$ ab, die um 90^0 so verdreht wird, wie $B B''$ verdreht werden muss um nach B_t zu gelangen. $C Q'$ wird dann mit C_j zu der Beschleunigung C'_j als der Resultierenden geometrisch zusammengesetzt.

Fig. 12a. Die Geschwindigkeit C_v des Punktes C setzt sich aus zwei Komponenten zusammen und zwar aus $C_{v'}$ und $C_{v''}$. $C_{v'}$ ist die Geschwindigkeit von C unter der Annahme, dass D für einen Moment festgehalten wird und $C_{v''}$ ist die Geschwindigknit von C unter der Annahme, dass B für einen Moment in Ruhe ist. Durch das in Fig. 11 erläuterte Hinzufügen einer Tangentialbeschleunigung im Punkte B wird in C eine zusätzliche Beschleunigung hervorgerufen, die senkrecht $C D$ ist, also dieselbe Richtung hat wie die Geschwindigkeitskomponente $C_{v'}$. Auch die Bestimmung des Richtungssinns und die Konstruktion von B'_t ist die gleiche, wie die von $C_{v'}$.

Daraus ergibt sich die einfache Konstruktionsregel, dass die einer beim Punkte B in das Getriebe eingeleiteten Bewegung nachträglich erteilte Tangentialbeschleunigung am Punkte C eine zusätzliche Beschleunigung hervorrufen wird, die sich ihrer Grösse und Richtung nach genau so bestimmen lässt, wie der Geschwindigkeitsanteil des Punktes C, der von der erwähnten eingeleiteten Bewegung herrührt; oder zusätzliche Tangentialbeschleunigungen können wie

Geschwindigkeiten behandelt werden.[2]) Man ist somit berechtigt eine auf dem Polstrahl abgetragene Tangentialbeschleunigung gleichlautend wie bei der Geschwindigkeit mit dem Namen lotrechte Tangentialbeschleunigung zu bezeichnen.

Wenn in dem Getriebe $A\,B\,C\,D\,E$ aus Fig. 11 und 12 der Punkt D in Ruhe ist, so erhält man einen Spezial-

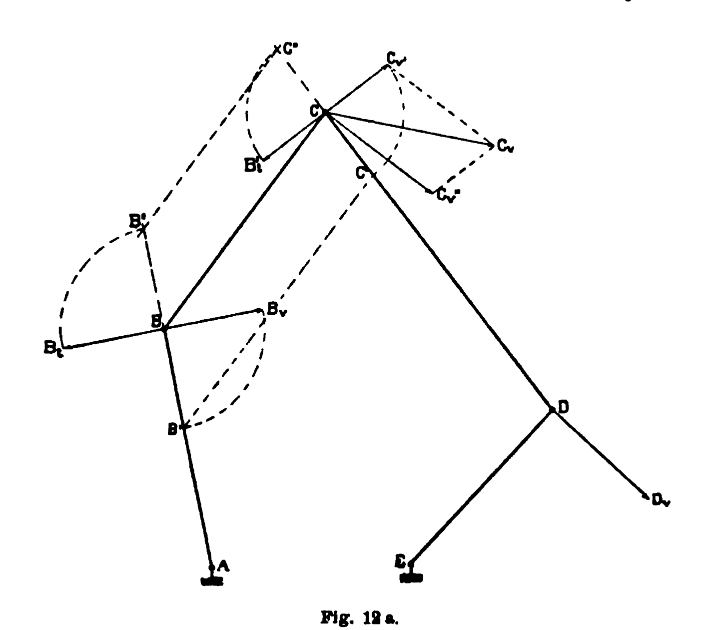


Fig. 12 a.

fall, der in den nachfolgenden Fig. 13 und 14 noch eingehender erläutert werden soll, da er in der vorliegenden Steuerung sehr oft verkommt.

Fig. 13. $A\,B\,C\,D$ ist ein Kurbelviereck. Um die festen Punkte A und D drehen sich die Stangen $A\,B$ und $C\,D$. Die Beschleunigung B_j des Punktes B und die dadurch auch bestimmten Geschwindigkeiten B_v und C_v der Punkte B und C sind gegeben. Es soll die Beschleunigung des Punktes C gesucht werden. Die Strecke B_v ist die Grösse der Relativgeschwindigkeit des Punktes C um B und nach Fig. 10 findet man $B\,B'$ als die Normalbeschleunigung dieser Relativbewegung, die in C in der Richtung $C\,B$ wirkt. B_j wird parallel an C angetragen

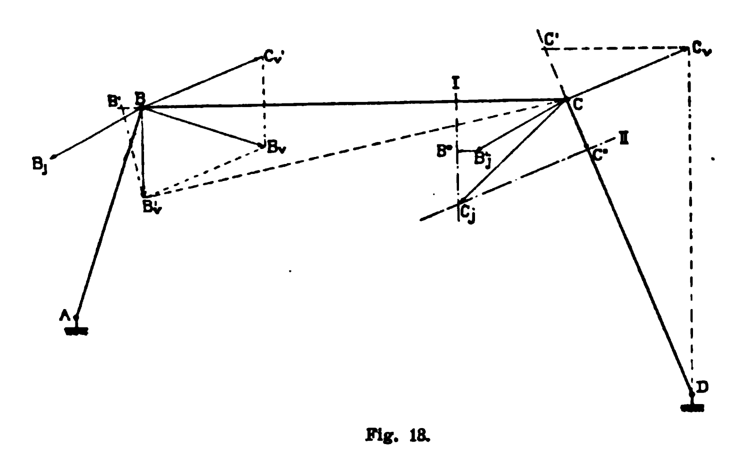


Fig. 13.

und daran die Normalbeschleunigung der Relativdrehung des Punktes C um B gefügt. Durch den Endpunkt B''' dieses Linienzuges fällt man ein Lot auf $B\,C$, das der erste geometrische Ort für C_j ist. C_v ist die Geschwindigkeit des Punktes C um D. Nach Fig. 10 ist dann die Normalbeschleunigung $C\,C''$. Ein Lot in C'' auf $C\,D$ ist der zweite geometrische Ort II für C_j. Die Verbindungslinie des Schnittpunktes von I und II mit C muss die gesuchte Beschleunigung C_j sein.

Fig. 14. Das Getriebe ist das gleiche wie in Fig. 13. Gegeben sind die Geschwindigkeiten und Beschleunigungen von B und C. Es soll die Beschleunigung eines beliebigen Punktes F der Stange $B\,C$ gesucht werden. Nach *Tolle* (Regelung der Kraftmaschinen S. 29) setzt sich die Beschleunigung des Punktes F aus zwei Komponenten zusammen, nämlich aus $F_{j'}$ und $F_{j''}$. $F_{j'}$ ist der Beschleunigungsanteil, den F von C her erhält. Er bestimmt sich aus der Gleichung:

$$F_{j'} = C_j \cdot \frac{B\,F}{B\,C}.$$

$F_{j'}$ ist parallel der Beschleunigung C_j. — $F_{j''}$ ist der Beschleunigungsanteil, den F vom Punkte B her erhält. $F_{j''}$ ist parallel B_j und bestimmt sich aus der Gleichung

$$F_{j''} = B_j \cdot \frac{C\,F}{B\,C}.$$

Werden diese beiden Komponenten geometrisch addiert, so geben sie die gesuchte Beschleunigung F_j.

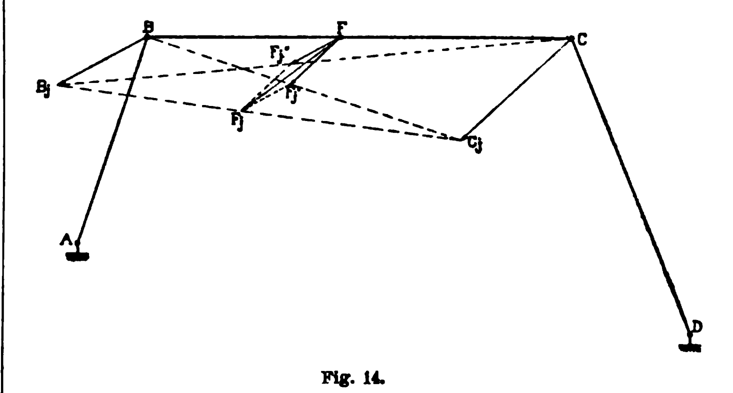


Fig. 14.

Verbindet man weiter die Endpunkte der Beschleunigungen B_j und C_j mit einander, so liegt auch der Endpunkt der Beschleunigung F_j auf dieser Verbindungslinie und zwar teilt er sie im gleichen Verhältnis, wie F die Strecke $B\,C$ teilt. Daraus ergibt sich für die Aufsuchung von F_j die folgende Konstruktion. Man verbindet die Endpunkte von B_j und C_j mit einander und teilt diese Verbindungslinie in demselben Verhältnis in dem F die Strecke $B\,C$ teilt. Die Verbindungslinie des Teilpunktes mit F ist die gesuchte Beschleunigung F_j ihrer Grösse und Richtung nach.

In den weiteren Figuren folgt die Anwendung der vorstehenden Beschleunigungskonstruktionen auf die einzelnen Stangen und Gelenkpunkte der zur Untersuchung vorliegenden Steuerung. Und zwar wird in den Fig. 15 bis 19 der erste Teil des Steuergetriebes, umfassend die Stangen $B\,C$, $C\,D$, $E\,F$, $F\,G$ und die Kulisse mit dem Kurbelmechanismus behandelt. Dieser Teil erhält nur eine Bewegung von der Kurbel her eingeleitet; während der zweite Teil, der aus den Stangen $I\,K$, $I\,L$, $M\,C$, $N\,O$ und dem Hilfsgetriebe besteht, einen doppelten Antrieb erhält und in den Fig. 20 - 27 behandelt werden soll.

Fig. 15. Gegeben ist die Beschleunigung des Kurbelzapfens. Es soll die Beschleunigung des Kreuzkopfes R bestimmt werden. Zuerst ist die Relativgeschwindigkeit des Kreuzkopfes um den Kurbelzapfen zu bestimmen. Dies geschieht wie in den Fig. 11 und 13 und ist $A_{v'}$ die Relativgeschwindigkeit ihrer Grösse nach. Nach Fig. 10

[2]) Dieses Resultat lässt sich auch aus dem folgenden Lehrsatz in *Burmesters* Lehrbuch der Kinematik ableiten: „Die Endpunkte F_j, L_j, der Beschleunigungen zweier Punkte F, L eines konplan bewegten ebenen Systems sind entsprechende Punkte zweier affiner ebener Systeme, in denen die Punkte F, L, sowie die Endpunkte von F_v, L_v ihrer Geschwindigkeiten entsprechende Punkte sind und in denen der momentane Wendepol der Doppelpunkt ist“.

ist dann $A\,A'$ die Normalbeschleunigung der Relativbewegung ihrer Grösse nach. Am Kreuzkopf R wird die Beschleunigung des Kurbelzapfens angetragen und daran ihrer Richtung nach die Normalbeschleunigung der Relativbewegung gefügt. Im Endpunkte A''' des so erhaltenen Linienzuges wird ein Lot zu $A\,R$ gefällt, das der erste

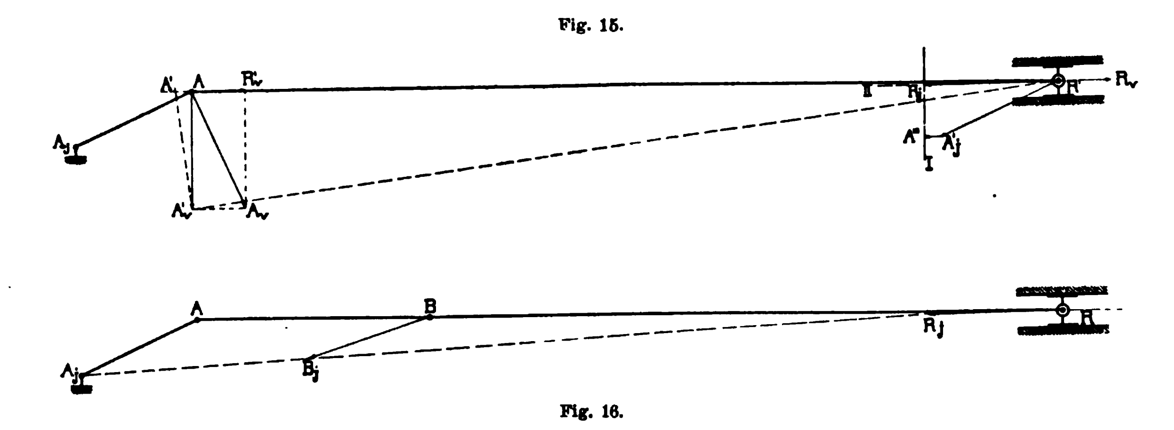


Fig. 15.

Fig. 16.

geometrische Ort I für die gesuchte Beschleunigung ist. Der Punkt R wird auf der Gleitbahn gerade geführt. Dies kommt einer Drehung um einen unendlich fernen Punkt gleich, für die die Normalbeschleunigung $= O$ ist. Der zweite geometrische Ort II muss also die Bahn von R selbst sein. Die Verbindungslinie des Schnittpunktes von I und II mit R ist die gesuchte Beschleunigung R_j.

Fig. 16. Gegeben sind die Beschleunigungen des Kurbelzapfens und des Kreuzkopfes. Es soll die Beschleunigung des auf der Triebstange liegenden Punktes B bestimmt werden. Nach Fig. 13 werden die Endpunkte der beiden gegebenen Beschleunigungen durch eine Gerade verbunden, und diese wird in demselben Verhältnis geteilt, in welchem der Punkt B die Strecke $A\,R$ teilt. Wird der Teilpunkt mit B verbunden, so ist diese Verbindungslinie die gesuchte Beschleunigung des Punktes B.

Fig. 17. Gegeben ist die Beschleunigung B_j des Punktes B, und gesucht soll die Beschleunigung C_j des Punktes C werden. Die Relativgeschwindigkeit des Punktes

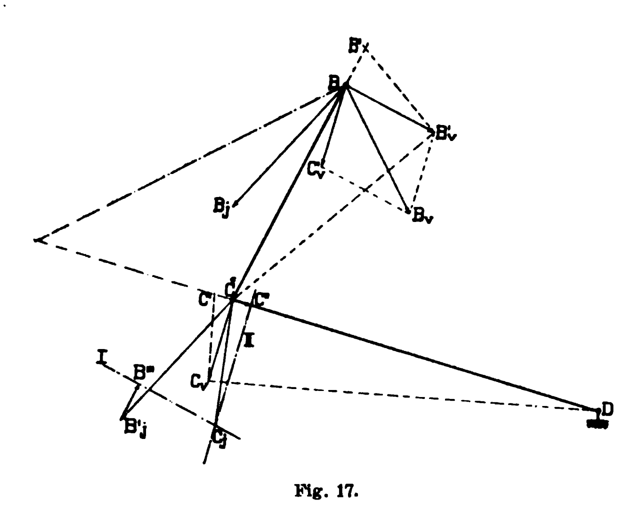


Fig. 17.

C um B wird bei B bestimmt und ist der Grösse nach B'_v. Nach Fig. 10 wird dann die Normalbeschleunigung dieser Relativbewegung der Grösse nach gleich $B\,B'$. Die Beschleunigung von B wird in C parallel angetragen und daran die Normalbeschleunigung der Relativbewegung gefügt. Dies gibt den Linienzug $C\,B'_j\,B'''$, durch dessen Endpunkt B''' ein Lot auf $B\,C$ gefällt wird, das der erste geometrische Ort I für C_j ist. Die Normalbeschleunigung der Drehung von C um D wird nach Fig. 10 bestimmt

und ist sowohl ihrer Grösse, als auch ihrer Richtung nach gleich $C\,C''$. Das Lot in C'' auf $C\,D$ ist der zweite geometrische Ort II für die gesuchte Beschleunigung des Punktes C. Somit muss C_j die Verbindungslinie des Schnittpunktes von I und II mit C sein.

Fig. 18. Gegeben sind die Beschleunigungen der Punkte B und C. Es soll die Beschleunigung des auf $B\,C$ liegenden Punktes E bestimmt werden. Nach Fig. 14 verbindet man die Endpunkte von B_j und C_j miteinander

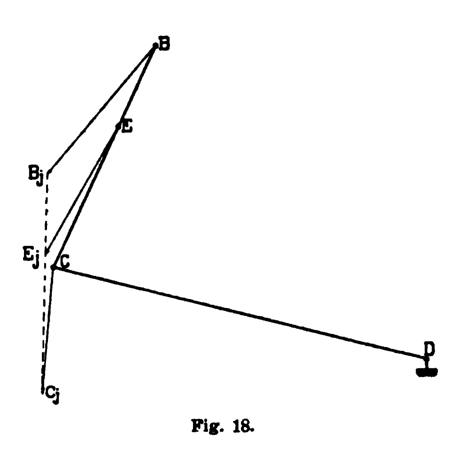


Fig. 18.

und teilt diese Verbindungslinie in dem gleichen Verhältnis in welchem der Punkt E die Strecke $C\,B$ teilt. Die Verbindungslinie dieses Teilpunktes mit E ist die gesuchte Beschleunigung E_j des Punktes E.

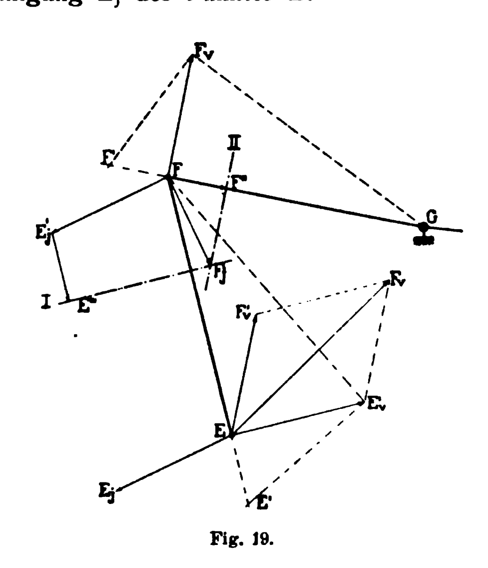


Fig. 19.

Fig. 19. Gegeben ist die Beschleunigung des Punktes E; es soll die Beschleunigung des Punktes F gesucht werden. Die Relativgeschwindigkeit des Punktes F um E

bestimmt sich wie früher, und sie ist ihrer Grösse nach E'_v. Die Normalbeschleunigung der Relativbewegung wird nach Fig. 10 konstruiert, und sie ist ihrer Grösse nach gleich $E E'$. Die Beschleunigung von E wird in F parallel angetragen und daran die Normalbeschleunigung der Relativbewegung gefügt. Durch den Endpunkt des so erhaltenen Linienzuges $F E'_j E'''$ wird ein Lot auf $E F$ gefällt, das der erste geometrische Ort I für F_j ist. F_v ist die Geschwindigkeit von F um G, und nach Fig. 10 wird die Normalbeschleunigung dieser Bewegung gleich $F F''$. Das Lot in F'' auf $F G$ ist der zweite geometrische Ort der gesuchten Beschleunigung von F. Somit muss F_j die Verbindungslinie des Schnittpunktes von I und II mit F sein.

Zur Aufsuchung der Beschleunigungen in den übrigen Steuerungsteilen wird das in Fig. 7 erwähnte Hilfsgetriebe eingeschaltet. Man ersetzt die Kulisse durch des Gelenk $G T H$, wobei $F G T$ als starres System zu betrachten ist, das sich um G dreht.

Fig. 20. Gegeben ist die Beschleunigung F_j und gesucht wird die Beschleunigung des Punktes T. Diese Beschleunigung T_j würde sich sehr einfach aus der Beziehung ergeben:

$$\Delta\, G\, T\, T_j \sim \Delta\, G\, F\, F_j.$$

Die daraus abgeleitete Konstruktion ist jedoch hier nicht ausgeführt, da es in diesem ganz speziellen Fall für die Genauigkeit der Resultate von Vorteil ist Normalbeschleunigung und Tangentialbeschleunigung einzeln zu bestimmen und hernach geometrisch zu addieren. Das führt zu der folgenden Konstruktion.

T_j setzt sich aus der Tangentalbeschleunigung T_t und der Normalbeschleunigung T_n zusammen. Die letztere kann nach Fig. 10 bestimmt werden, da die Geschwindigkeit T_v bekannt ist. Die Tangentialbeschleunigung T_t kann nach der Gleichung

$$T_t = G\, T\, .\, \varepsilon$$

bestimmt werden, wobei ε die Winkelbeschleunigung des Systems $F G T$ ist. Diese Winkelbeschleunigung wird aus der bekannten Tangentialbeschleunigung des Punktes F bestimmt. Es ist:

$$\varepsilon = F_t : G\, F.$$

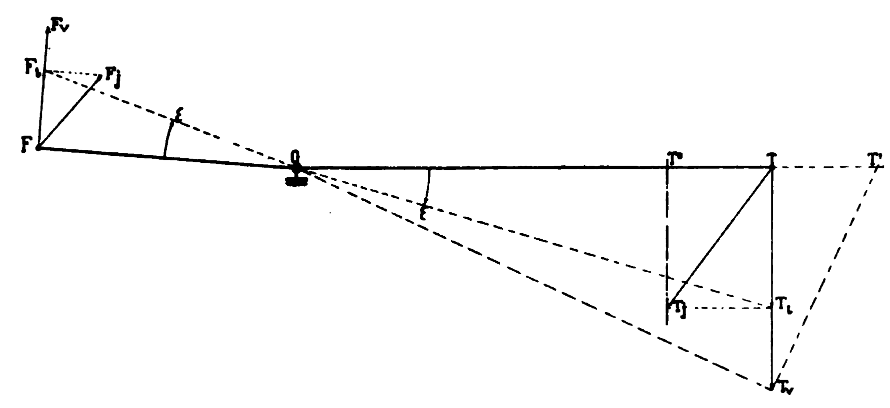


Fig. 20.

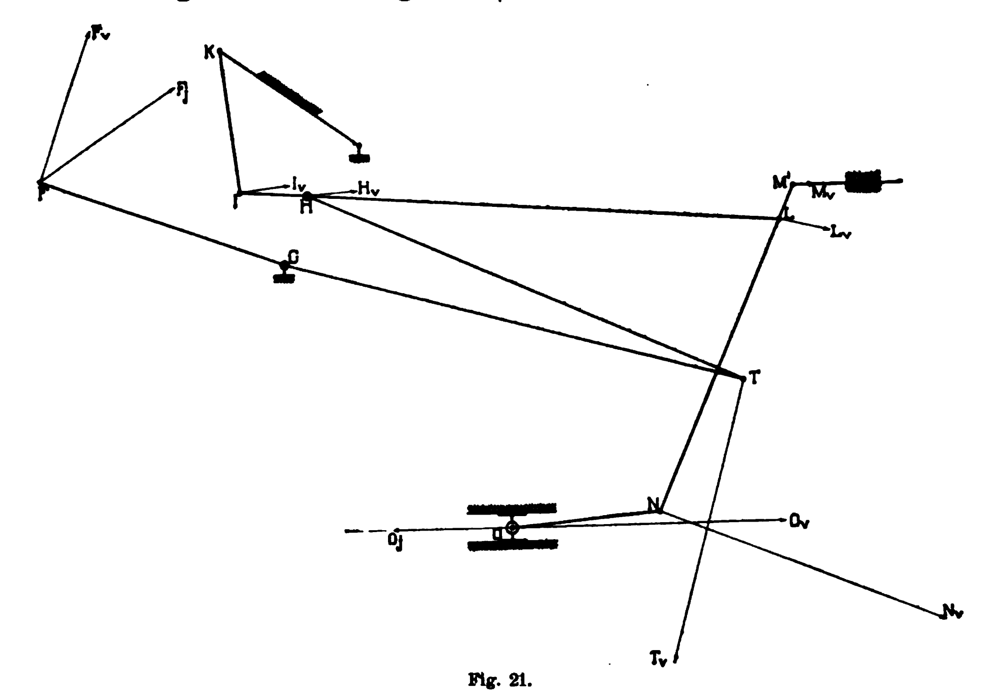


Fig. 21.

Somit ergibt sich für

$$T_t = G\, T\, .\, \frac{F_t}{G\, F} = F_t \cdot \frac{G\, T}{G\, F}.$$

T_t wird an T so angetragen, dass sie der Richtung der Winkelbeschleunigung entspricht und dann mit der Normalbeschleunigung $T\, T''$ zur Resultierenden T_j zusammengesetzt. T_j ist die gesuchte Beschleunigung des Punktes T.

Fig. 21. Die bis jetzt noch nicht behandelten Steuerungsteile erhalten einen doppelten Antrieb; einesteils durch den um G drehbaren mit $F G$ fest verbundenen Hebel $G T$ und andernteils durch den Kreuzkopf im Punkte O

Die Beschleunigungen von T und O sind gegeben; es sollen die Beschleunigungen der Punkte H, I, L, M und N gesucht werden. Zur Lösung dieser Aufgabe wird der folgende Weg eingeschlagen.

Man denke sich zuerst das Gelenk F gelöst, so dass das System $F\,G\,T$ sich um G frei drehen kann, ohne auf das Getriebe eine Bewegung einzuleiten.

Ferner denke man sich bei dem Punkte M eine Bewegung so eingeleitet, dass M sich ohne Beschleunigung

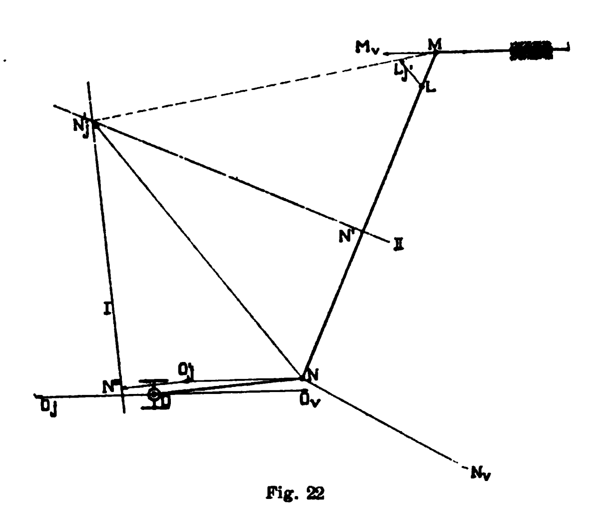


Fig. 22

mit der konstanten Geschwindigkeit M_v bewegt. M_v ist die Geschwindigkeit des Punktes M, die er als Punkt des Steuerungsgetriebes augenblicklich hat. An den momentanen Geschwindigkeiten der übrigen Gelenkpunkte, einschliesslich des Punktes T wird dadurch nichts geändert, während die Beschleunigungen dieser Punkte ausschliesslich des Punktes O im allgemeinen andere sein werden, als unter der ursprünglichen Voraussetzung, dass die zweite Bewegung durch das System $F\,G\,T$ eingeleitet wird. Die Beschleunigungen, die den Punkten I, H, L, N und T erteilt werden, wenn in M eine Bewegung von der konstanten Geschwindigkeit M_v in das Getriebe eingeleitet wird, sollen in den folgenden Fig. 22—24 bestimmt werden.

Fig. 22. Gegeben ist die Beschleunigung des Punktes O und gesucht werden die Beschleunigungen der Punkte N und L. Ferner ist noch bekannt, dass M sich mit konstanter Geschwindigkeit bewegt. Nach Fig. 11 trägt man O_j in N parallel an und fügt daran ihrer Richtung und Grösse nach die Normalbeschleunigung der Relativbewegung des Punktes N um O. Durch den Endpunkt

Fig. 23.

N''' des so erhaltenen Linienzuges $N\,O'_j\,N'''$ wird ein Lot auf $N\,O$ gefällt, dass der erste geometrische Ort I für $N_{j'}$ ist. Der zweite geometrische Ort II ist das Lot in N' auf $M\,N$, wobei $N\,N'$ die Normalbeschleunigung der Relativbewegung des Punktes N um M ist. Das Aufsuchen der Normalbeschleunigungen der Relativbewegungen ist in Fig. 11 erläutert. Die Verbindungslinie des Schnittpunktes von I und II mit N gibt die gesuchte Beschleunigung $N_{j'}$.

Die Konstruktion der Beschleunigung von L geschieht nach Fig. 14 und gestaltet sich hier sehr einfach, da die Beschleunigung von $M = O$ ist. Der Endpunkt von $N_{j'}$ wird mit M verbunden und bis zu dieser Verbindungslinie durch L eine parallele Gerade zu $N_{j'}$ gezogen, die dann ihrer Grösse und Richtung nach die gesuchte Beschleunigung $L_{j'}$ des Punktes L ist.

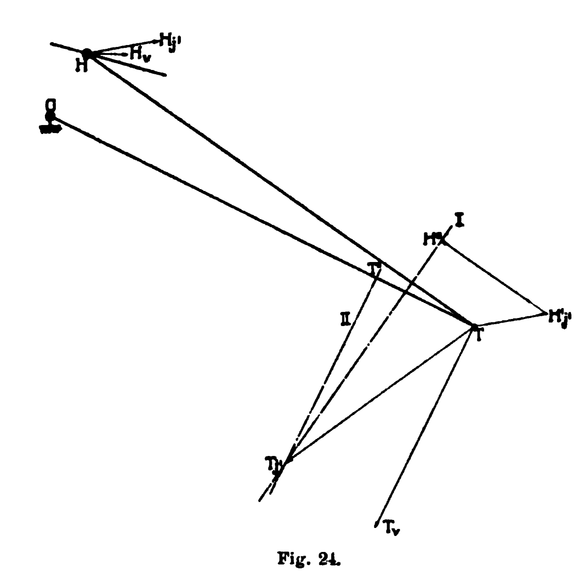


Fig. 24.

Fig. 23. Gegeben ist die Beschleunigung des Punktes L. Es sollen die Beschleunigungen der Punkte I und H bestimmt werden. Dabei sei darauf hingewiesen, dass auch diese Figur mit der vorstehenden und der folgenden in keinem Zusammenhang steht, dass die gegebenen Ge-

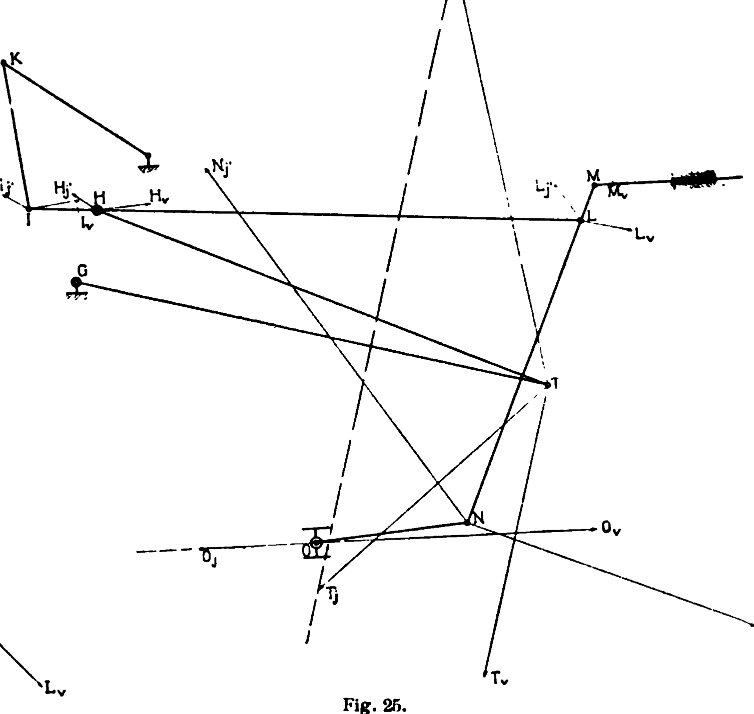


Fig. 25.

schwindigkeiten und Beschleunigungen, sowie die gegenseitige Lage der Stangen mit Rücksicht auf die Erzielung einer deutlichen Figur frei gewählt wurden. Die Bestimmung der gesuchten Beschleunigungen wird nach Fig. 13 durchgeführt. $L_{j'}$ wird parallel an I angetragen und daran die Normalbeschleunigung der Relativbewegung des Punktes I um L gefügt. Im Endpunkte L''' dieses Linienzuges $I\,L'_{j'}\,L'''$ wird ein Lot auf $L\,I$ errichtet, das der erste ge-

ometrische Ort I für $I_{j'}$ ist. Die Normalbeschleunigung der Drehung von I um K wird nach Fig. 10 bestimmt und ist Grösse und Richtung nach $I\,I''$. Ein Lot in I'' auf I K ist der zweite geometrische Ort II für die gesuchte Beschleunigung $I_{j'}$.

Um $H_{j'}$ zu finden, wird nach Fig. 13 der Endpunkt der Beschleunigung $I_{j'}$ mit dem Endpunkt der Beschleunigung $H_{j'}$ verbunden und diese Verbindungslinie in dem gleichen Verhältnis geteilt, in welchem der Punkt H die Strecke $I\,L$ teilt. Die Verbindungslinie des Teilpunktes mit H ist die gesuchte Beschleunigung $H_{j'}$.

Fig. 24. Gegeben ist die Beschleunigung des Punktes H und gesucht soll diejenige des Punktes T werden. Nach Fig. 13 trägt man $H_{j'}$ an T parallel an und fügt an $H'_{j'}$ die Normalbeschleunigung der Relativbewegung des Punktes T um H. Im Endpunkte H''' des so erhaltenen Linienzuges $T\,H'_{j'}\,H'''$ wird ein Lot auf $H\,T$ errichtet, das der erste geometrische Ort I für $T_{j'}$ ist. Die Normalbeschleunigung der Drehung von T um G wird nach Fig. 10 be-

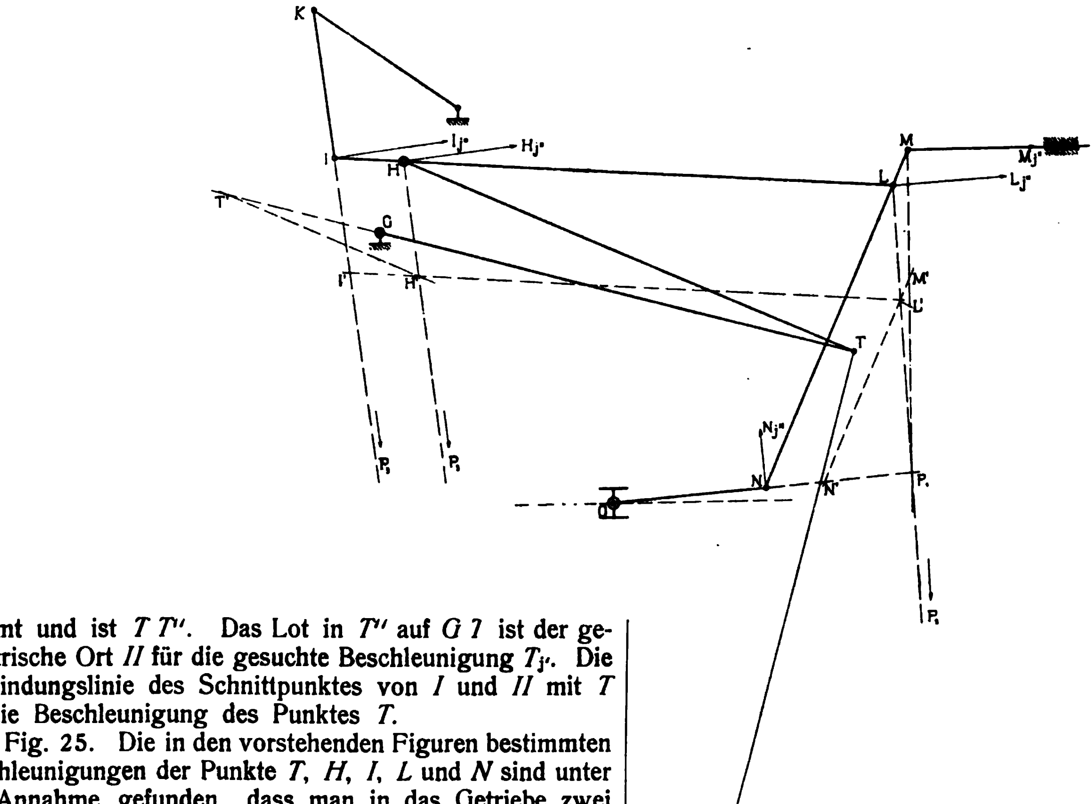


Fig. 26.

stimmt und ist $T\,T''$. Das Lot in T'' auf $G\,T$ ist der geometrische Ort II für die gesuchte Beschleunigung $T_{j'}$. Die Verbindungslinie des Schnittpunktes von I und II mit T ist die Beschleunigung des Punktes T.

Fig. 25. Die in den vorstehenden Figuren bestimmten Beschleunigungen der Punkte T, H, I, L und N sind unter der Annahme gefunden, dass man in das Getriebe zwei Bewegungen einleitet, und zwar bei M die konstante Geschwindigkeit M_v und bei dem Punkte O eine Bewegung von der Geschwindigkeit O_v und der Beschleunigung O_j. Die Bewegung sämtlicher Punkte wird die gleiche bleiben, wenn man sich nicht in M die gleichförmige Bewegung, sondern bei T die Bewegung von der Geschwindigkeit T_v und der Beschleunigung $T_{j'}$ eingeleitet denkt. Wäre nun zufällig $T_{j'} = T_j$, so könnte man den Hebel $G\,F$ im Punkte F mit der Stange $E\,F$ wieder gelenkig verbinden. Die Beschleunigungen $T_{j'}$ und T_j haben aber die gleiche Normblbeschleunigung $T\,T'$, denn diese hängt nur von der Geschwindigkeit T_v und dem Krümmungshalbmesser $T\,G$ der Bahn des Punktes T ab; und diese beiden Grössen sind durch die Lösung des Gelenkes in F nicht beeinflusst worden. Um also für den Punkt T die gleiche Bewegung zu erhalten, wie er sie tatsächlich durch das System $F\,G\,T$ erteilt bekommt, muss der oben bestimmten Bewegung des losen Hebels noch eine zusätzliche Tangentialbeschleunigung von der Grösse $T_{j'}\,T_j$ erteilt werden, die so gerichtet ist, dass sie mit $T_{j'}$ geometrisch zusammengesetzt die Beschleunigung T_j ergibt. Diese zusätzliche Tangentialbeschleunigung wird die Beschleunigungen sämtlicher Gelenkpunkte ausschliesslich des Punktes O ändern, so dass auch die Beschleunigung des Punktes M statt Null eine bestimmte Grösse werden wird.

Fig. 26. Gegeben sind die in den vorigen Figuren gefundenen Beschleunigungen der Gelenkpunkte T, I, H, L, M und N, sowie die Beschleunigung O_j. Das sind die Beschleunigungen, wenn bei T die Geschwindigkeit T_v und die Beschleunigung $T_{j'}$, sowie bei O die Kreuzkopfbewegung eingeleitet wird. Dem Punkte T wird die zusätzliche Tangentialbeschleunigung $T_{j''}$ erteilt. Es sollen die dadurch zu den in dieser Figur gegebenen Beschleunigungen hinzukommenden Beschleunigungskomponenten bestimmt werden. Diese Beschleunigungskomponenten werden nach Fig. 12 wie Geschwindigkeiten behandelt und demgemäss aufgesucht. Punkt O wird dabei als fester Punkt gedacht. Die Polstrahlen des Getriebes sind in Fig. 7 schon bestimmt worden. Die Tangentialbeschleunigung $T_{j''}$ wird auf dem Polstrahl $G\,T$ des Systems $H\,T$ abgetragen und durch den Endpunkt T' der lotrechten Tangentialbeschleunigung $T\,T'$ eine parallele Gerade zu $H\,T$ gezogen. Diese schneidet auf dem Polstrahl $H\,P_2$ die lotrechte Tangentialbeschleunigung $H\,H'$ ab. Eine parallele Gerade durch H' zu $I\,L$ gibt auf $I\,P_2$ und $L\,P_2$ die lotrechten Tangentialbeschleunigungen $I\,I'$ und $L\,L'$. Durch L' wird noch eine parallele Grade zu $M\,N$ gezogen, die auf $M\,P_1$ und $N\,P_1$ die lotrechten Tangentialbeschleunigungen der Punkte M und N abschneidet. Ebenso wie bei den Geschwindigkeiten werden die lotrechten Tangentialbeschleunigungen senkrecht zum Polstrahl so angetragen, dass sie mit der jeweiligen Ausgangsgrösse das betreffende System in derselben Drehrichtung um den Pol beschleunigen. Die so gefundenen Beschleunigungen sind $H_{j''}$, $I_{j''}$, $L_{j''}$, $M_{j'}$ und $N_{j''}$.

Fig. 27. In dieser Figur werden die in den beiden vorhergegangenen Fig. 25 und 26 eingezeichneten Beschleunigungskomponenten j' und j'' zur resultierenden j zusammengesetzt. Diese Resultierende ist dann die Beschleunigung der Punkte I, H, L, M und N, wenn bei T die Bewegung des Systems $F\,G\,T$ und beim Punkte O die Kreuzkopfbewegung gleichzeitig in das Getriebe eingeleitet wird.

Damit ist der zweite Teil der Aufgabe gelöst. Danach ist es möglich, zu den im ersten Teil gefundenes Geschwindigkeiten die jeweiligen Beschleunigungen den ganzen Steuerungsgetriebes zu bestimmen. Es bleibt nun nur noch übrig die Untersuchung der Massenwirkung des bewegten Steuerungsgetriebes.

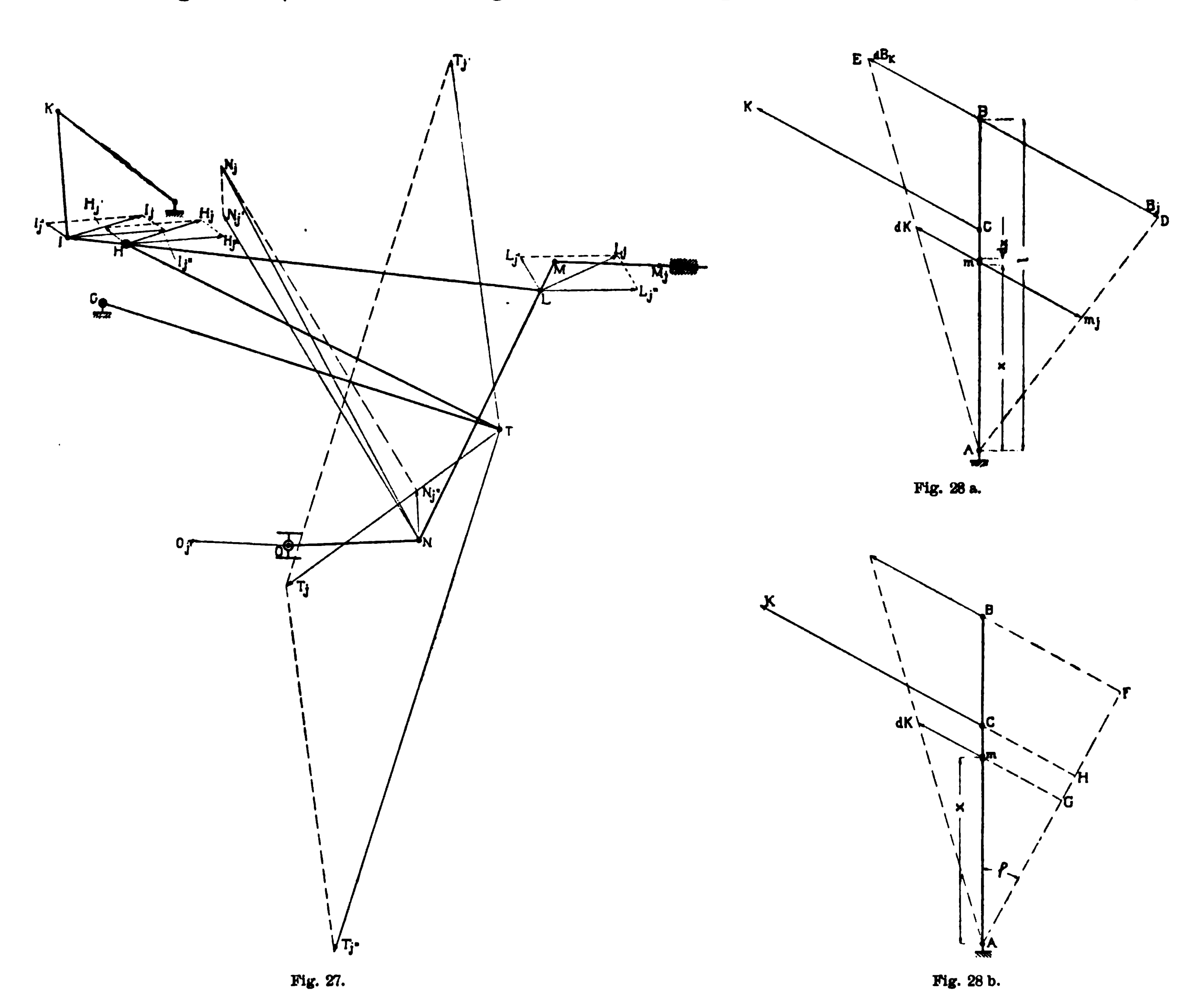


Fig. 27.

Fig. 28 a.

Fig. 28 b.

III. *Bestimmung der Trägheitskräfte.*

Vom einfachsten Fall ausgehend soll die Behandlung der Massenwirkung für das ganze Steuerungsgetriebe gezeigt werden.

Fig. 28. Die materielle Stange $A\,B$ rotiere um den festen Punkt A in der Weise, dass der Endpunkt B der Stange momentan die Beschleunigung B_j besitzt. Die Masse der Stange sei gleichmässig auf die ganze Länge verteilt und die Querabmessungen sollen gegenüber den Längenabmessungen vernachlässigt werden.

Man betrachtet zuerst in Fig. 28a die dynamische Wirkung eines unendlich kleinen Massenteilchens m von der Länge $d\,x$ im Abstande x vom Drehpunkt A. Bezeichnet M die Masse der ganzen Stange und l die Länge der Stange, so ist

$$m = M \cdot \frac{d\,x}{l}$$

Das Massenteilchen m hat die Beschleunigung m_j, die bestimmt wird, indem man D mit A verbindet und m_j parallel zu B_j, bis zum Schnitt mit $D\,A$ zieht. Nach dem *d'Alembert*schen Prinzip kann die dynamische Wirkung des bewegten Massenteilchens m durch Einführung einer gedachten äusseren Kraft $d\,K$, der Trägheitskraft ersetzt werden. Diese muss stets entgegengesetzt gerichtet der Beschleunigung m_j sein, und ist ihrer Grösse nach:

$$d\,K = m \cdot m_j = M \frac{d\,x}{l} \cdot B_j \cdot \frac{x}{l}$$

$$= M \cdot B_j \cdot \frac{x \cdot d\,x}{l^2}.$$

Denkt man sich die ganze Stange $A\,B$ in lauter kleine Massenteilchen von der Länge $d\,x$ zerlegt und für jedes die Trägheitskraft $d\,K$ bestimmt, so müssen die Endpunkte aller $d\,K$ auf einer Geraden liegen, da auch die Endpunkte aller Beschieunigungen m_j auf einer geraden Linie liegen. Ferner müssen sie selbst und ihre resultierende die gleiche Richtung haben und zwar entgegengesetzt den Beschleunigungen. Die Grösse dieser Resultierenden erhält man durch Integration der obigen Gleichung.

$$K = \int_0^l d\,K = \int_0^l M \,.\, B_j \cdot \frac{1}{l^2} \,.\, x \,.\, d\,x$$
$$= M \,.\, B_j \cdot \frac{1}{l^2} \cdot \frac{l^2}{2} = \frac{1}{2}\, M \,.\, B_j.$$

Der Angriffspunkt der Resultierenden K bestimmt sich nach Fig. 28b durch die Bedingung, dass das statische Moment der Resultierenden gleich der Summe der statischen Momente der Einzelkräfte sein muss. Zieht man $A\,F$ senkrecht auf die Kraftrichtung, so ist für eine Einzelkraft $d\,K$ das statische Moment:

$$\mathfrak{M} = d\,K \,.\, A\,G$$
$$= M \,.\, B_j \cdot \frac{1}{l^2} \cdot x \,.\, d\,x \,.\, x \cos \varphi$$
$$= M \,.\, B_j \cdot \frac{1}{l^2} \,.\, \cos \varphi \,.\, x^2 \,.\, d\,x.$$

Das Integral dieser Gleichung gibt das resultierende statische Moment:

$$\mathfrak{M} = M \,.\, B_j \cdot \frac{1}{l^2} \,.\, \cos \varphi \,.\, \int_0^l x^2 \,.\, d\,x$$
$$= M \,.\, B_j \cdot \frac{1}{l^2} \,.\, \cos \varphi \cdot \frac{1}{3}\, l^3$$
$$= M \,.\, B_j \cdot \frac{1}{3}\, l \,.\, \cos \varphi.$$
$$= K \cdot \frac{2}{3}\, l \,.\, \cos \varphi.$$

Aus der Figur ergibt sich das statische Moment der Kraft K.

$$\mathfrak{M} = K \,.\, A\,C \,.\, \cos \varphi.$$

Es muss also:

$$A\,C = \frac{2}{3}\, l = \frac{2}{3}\, A\,B$$

sein.

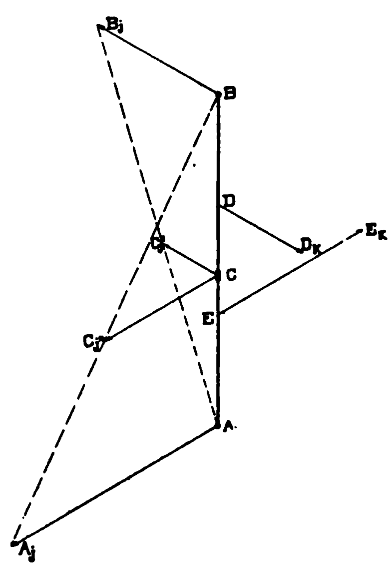


Fig. 29a.

Die gedachte Trägheitskraft K, deren Grösse und Angriffspunkt vorstehend bestimmt wurden, ersetzt die dynamische Wirkung der bewegten Stange $A\,B$ von der Masse M. Die dynamische Aufgabe wurde dadurch in eine statische verwandelt.

Fig. 29. Die Stange $A\,B$ werde so bewegt, dass A die Beschleunigung A_j und B die Beschleunigung B_j hat. Es ist Richtung, Grösse und Angriffspunkt der Trägheitskraft der Stange $A\,B$ zu suchen. Angenommen sei wieder, dass die Masse gleichmässig auf die geometrische Linie $A\,B$ verteilt ist.

In Fig. 29a wird die dynamische Wirkung eines unendlich kleinen Massenteilchens m im Punkte C untersucht. Nach Fig. 14 ist die Beschleunigung des Teilchens m die Resultierende aus zwei Komponenten, $C_{j'}$ und $C_{j''}$. Die erstere ist die Beschleunigung, die C erhält durch die Bewegung des Punktes B und die letztere ist die Beschleunigung, die C erhält durch die Bewegung des Punktes A. Diese Zerlegung der Bewegung kann man auch auf die Trägheitskräftebestimmung ausdehnen, und demgemäss zuerst die Trägkeitskraft D_k bestimmen. Diese Kraft D_k ersetzt dann dynamische Wirkung der Stange, welche von der Bewegung herrührt, die der Stange im Punkte B er-

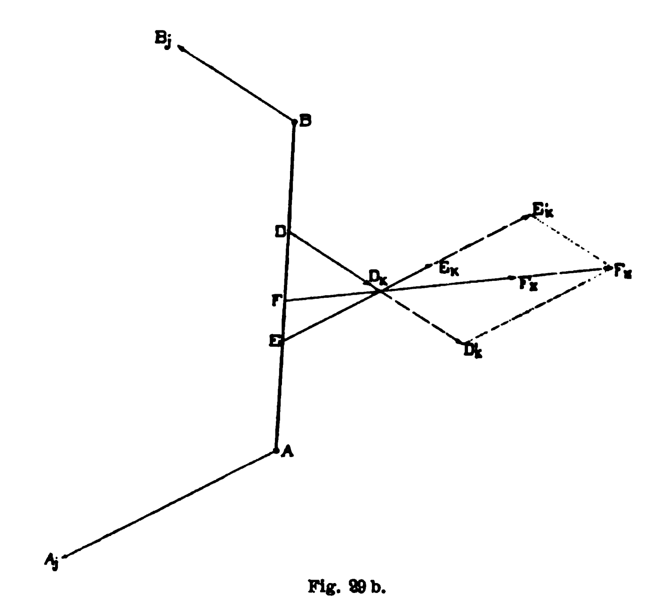


Fig. 29b.

teilt wird. Diese Kraft D_k und die weitere Trägheitskraft E_k, die die dynamische Wirkung der Stange ersetzt, welche von der Bewegung herrührt, die der Stange im Punkte A erteilt wird, werden nach Fig. 28 bestimmt. Danach ist

$$D_k = \frac{1}{2}\, M\ B_j \text{ und } E_k = \frac{1}{2}\, M \,.\, A_j.$$

D_k ist parallel B_j und E_k parallel A_j. Ihre Angriffspunkte auf der Stange $A\,B$ sind so gelegen, dass

$$A\,E = \frac{1}{3}\, A\,B \text{ und } B\,D = \frac{1}{3}\, A\,B$$

wird.

In Fig. 29b sind E_k und D_k zu einer Resultierenden F_k vereinigt, die ihrer Grösse und Richtung nach die Trägheitskraft der Stange $A\,B$ darstellt und als eine gedachte Kraft im Angriffspunkte F die dynamische Wirkung der bewegten Stange ersetzt.

Die Bestimmung der Trägheitskraft für die bewegten Steuerungsteile ist bei allen Stangen und Hebeln nach vorstehenden Erläuterungen durchzuführen und immer die gleiche, weshalb in den folgenden Figuren von der jedesmaligen Aufsuchung derselben abgesehen werden kann und nur die statische Verteilung der Trägheitskräfte auf die Gelenkpunkte der Steuerung untersucht werden soll. Bei der Berechnung der Trägheitskraftkomponenten aus der Formel

$$K = \frac{1}{2}\, M \cdot j,$$

ist es nötig, die Beschleunigung j der Stangenendpunkte und die Masse der Stange zu kennen.

Erstere wurden schon im zweiten Teil der Aufgabe bestimmt und letztere kann aus der Tab. 1 entnommen werden. Im folgenden ist stets die Trägheitskraft einer Stange mit K_0 bezeichnet, während die nach den Gelenkpunkten zerlegten Trägheitskräfte mit dem Buchstaben des betreffenden Gelenkpunktes und dem Index k bezeichnet werden.

Tabelle 1.

	Länge in mm	Gewicht in kg	Masse in kg $\frac{\text{sek}^2}{\text{m}}$
Schieber und Schieberstange	—	107,10	10,92
Voreilhebel MN	700	18,50	1,89
Mitnehmerstange NO	295	5,50	0,56
Schubstange JL und Stein H	1077	40,50	4,13
Hängestange KJ	285	5,50	0,56
Kulisse	—	32,00	3,26
Hebel FG	515	15,00	1,53
Hebel EF	534	21,50	2,19
Hebel BC	480	18,00	1,84
Hebel CD	760	12,50	1,27
Innere Steuerungsteile	—	107,10	10,92
Aeussere Steuerungsteile	—	169,00	17,23
Ganzes Steuergetriebe	—	276,00	28,15

Fig. 30. K_0 ist die Trägheitskraft der Mitnehmerstange MN. Es soll die Verteilung derselben auf die einzelnen Gelenkpunkte K, I, H, L, M, N und O gesucht werden. Die Stange KI ist um K frei drehbar; es kann somit das Gelenk I nur eine Kraft aufnehmen und nach

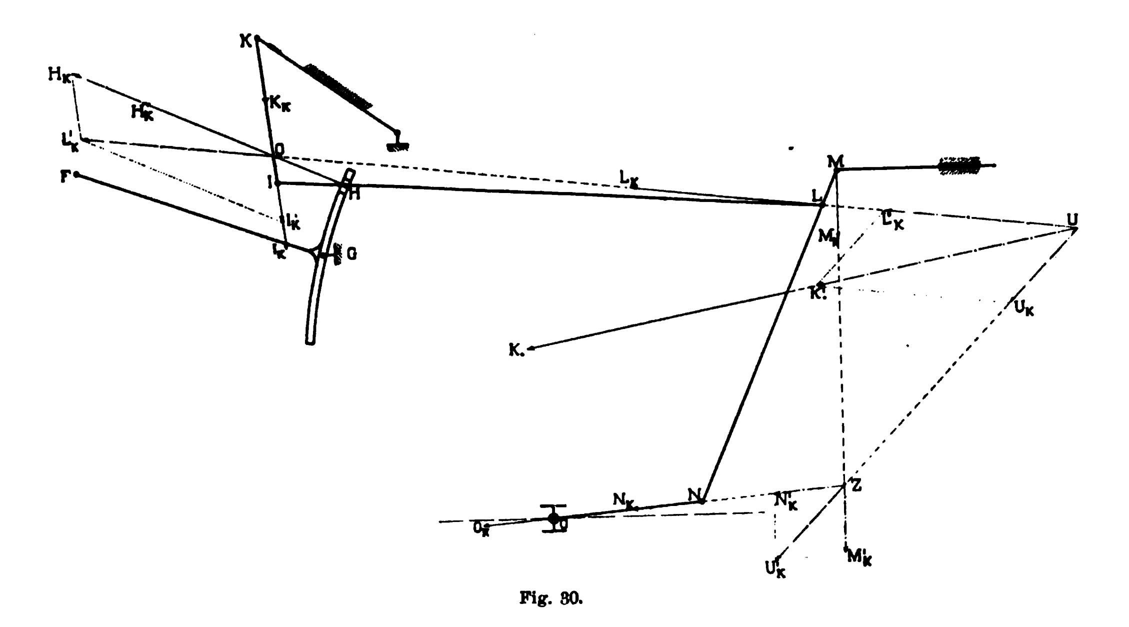


Fig. 30.

K weiterleiten, welche die Richtung KI hat. Desgleichen kann der Stein G nur eine Kraft aufnehmen, die senkrecht zur Kulissenkrümmung im Punkte H steht, denn jede anders gerichtete Kraft würde eine Komponente in Richtung der Kulissenkrümmung haben, und dieser könnte der Stein keinen Widerstand entgegensetzen, da er in der Kulisse frei gleiten kann. Die dritte an der Stange IHL angreifende Kraft ist die in L auftretende Trägheitskraft, deren Richtung derart sein muss, dass sie sich mit den beiden Richtungen der Kräfte in I und H in einem Punkte schneidet; denn nur dann ist die Stange IL im Gleichgewicht KI und die Richtung von H_k schneiden sich im Punkte Q. Somit muss die noch unbekannte Kraft L_k die Richtung QL haben. An der Stange MN greift die gedachte Trägheitskraft K_0 an, die sich auf die drei Gelenkpunkte N, L und M verteilt. Die Richtung der in L auftretenden Kraft ist schon oben bestimmt und ist QL. Die Richtung der Kraft in M kann nur senkrecht zur Geradführung der Schieberstange sein; denn jede anders gerichtete Kraft würde eine Komponente in Richtung der Schieberstangenführung haben, und dieser Komponente würde die Schieberstange keinen Widerstand entgegensetzen können. Schliesslich ist noch die Kraft in N vorhanden, die nur die Richtung NO haben kann, da NO frei drehbar um O ist. Es ist nun die statische Aufgabe zu lösen, die Trägheitskraft K_0 nach diesen drei Richtungen zu zerlegen. Man bringt die beiden Richtungen der Kräfte in M und N in Z zum Schnitt. Desgleichen bestimmt man den Schnittpunkt U der Richtung von K^0 mit QL. Z wird mit U verbunden und K_0 als K'_0 nach U verlegt. K'_0 zerlegt man in zwei Komponenten, deren eine L''_k die Richtung ULQ hat und deren andere U_k die Richtung UZ hat. U_k wird als U'_k nach Z verlegt und da in die Komponenten M'_k und N'_k zerlegt, die dann in ihren Richtungen nach den Punkten M und N verlegt die Kräfte M_k und N_k geben. N_k wird in Richtung der Stange NO weitergeleitet und in O als die Kraft O_k vom Kreuzkopf aufgenommen. L''_k wird nach L versetzt und gibt da L_k; doch kann der Punkt L diese Kraft nicht direkt aufnehmen, sondern leitet sie nach H und I weiter. Man verlegt deshalb die Kraft L_k als L'_k nach Q und zerlegt diese Kraft da in die beiden Komponenten I'_k und H'_k, die in ihren Richtungen nach I und H versetzt die gesuchten Kräfte I_k und H_k geben. Die Kraft H_k wird von der Kulisse aufgenommen und durch die Hebel FG und EF weitergeleitet. In welcher Weise dies geschieht, soll in der Fig. 33 erläutert werden. I_k wird durch die Stange IK nach K weitergeleitet und tritt hier als die Kraft K_k auf. Die gesuchte Verteilung der Trägheitskraft K_0 auf die verschiedenen Gelenkpunkte wäre somit eine derartige, dass auf M die Kraft M_k, auf N die Kraft N_k, auf O die Kraft O_k, auf L die Kraft L_k, auf I die Kraft I_k, auf K die Kraft K_k und auf H die Kraft H_k trifft.

Fig. 31. Gegeben ist die Trägheitskraft K_0 der Stange NO. Die Verteilung derselben auf die Steuerungsgelenkpunkte K, I, H, L, M, N und O soll gesucht werden. Die Richtungen der Kräfte in I, H, L und M bestimmen sich wieder wie in Fig. 30. An der Stange MN greifen drei Kräfte an. Von zweien dieser Kräfte, nämlich der in M und der in L auftretenden Kraft sind bereits die Richtungen bekannt. Erstere ist das Lot in M auf der

Schieberstangenführung und letztere ist QL. Damit Gleichgewicht an der Stange MN ist, muss die Richtung der dritten Kraft in N durch den Schnittpunkt U der beiden andern Richtungen gehen. Auch an der Stange NO müssen sich die drei Kräfte K_0, N_k und O_k in einem Punkte schneiden, weshalb man K_0 als K'_0 nach dem Schnittpunkt Z der Trägheitskraft K_0 mit der Richtung von N_k verlegt und da in zwei Komponenten zerlegt, deren eine N'_k die Richtung UZN hat und deren andere O'_k die Richtung ZO hat. Diese beiden Kraftkomponenten sind nach O und N verlegt die Kräfte O_k und N_k. Während O_k vom Kreuzkopf aufgenommen wird, wird N_k nach M und L weitergeleitet. Man verlegt N_k als N''_k nach U und zerlegt es da in die bekannten Richtungen der Kräfte in L und M. L'_k und M'_k sind die Kraftkomponenten von N''_k, die nach L und M verlegt die Kräfte L_k und M_k geben. M_k wird von der Schieberstangenführung aufgenommen und L_k wird nach I und H weitergeleitet. Man verlegt deshalb L_k als L''_k nach Q und zerlegt es wie in Fig. 30 in die Komponenten I'_k und H'_k, die in ihren Richtungen nach I und H versetzt die Kräfte I_k und H_k geben. I_k wird wieder nach K weitergeleitet und greift hier als die Kraft K_k an. H_k wird von der Kulisse aufgenommen. Die gesuchten Kräfte an den Gelenkpunkten K, I, H, L, M, N und O sind dann K_k, I_k, H_k, L_k, M_k, N_k und O_k.

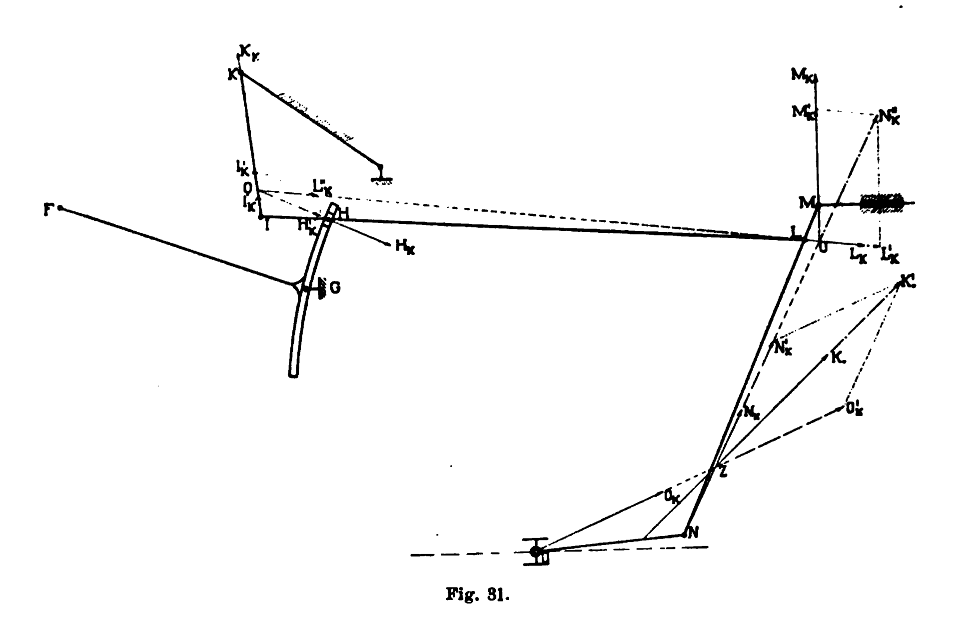


Fig. 31.

Fig. 32. Gegeben ist die Trägheitskraft K_0 der Schubstange IHL. Es soll die Verteilung dieser Kraft auf die Punkte K, I, H, L, M, N und O bestimmt werden. Die Richtungen der Kräfte, die die Punkte K, I, H, M, N und O aufnehmen können sind schon in Fig. 29 bestimmt worden. Demnach müssen K_k und I_k die Richtung KI haben, H_k muss senkrecht zur Kulissenkrümmung im Punkte H stehen, M_k muss senkrecht zur Schieberstangenführung sein und die beiden Kräfte O_k und N_k müssen in die Richtung NO fallen. Nun bleibt noch übrig die Kraftrichtung im Punkte L zu bestimmen. L_k greift mit M_k und N_k an der Stange MLN an. Damit diese im Gleichgewicht ist, müssen die drei Kraftrichtungen in einem Punkte sich schneiden. Der Schnittpunkt der Kraftrichtungen von M_k und N_k ist der Punkt Z. Danach

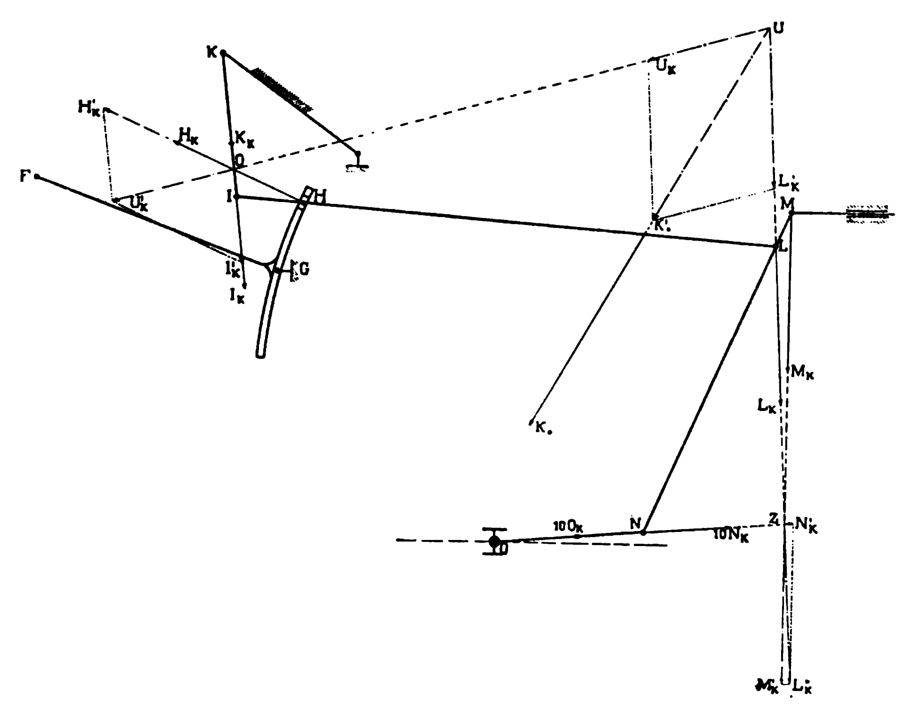


Fig. 32

ist die Richtung von L_k die Linie LZ. Die Trägheitskraft K_0 muss auf die drei Punkte I, H und L verteilt werden, wobei die Richtungen der in diesen Punkten auftretenden Kräfte ganz bestimmte sind. Man verlegt K_0 bis zum Schnittpunkt U mit der Kraftrichtung ZL und zerlegt $K'_0 = K_0$ in die beiden Komponenten U_k und L'_k. Q verlegt wird und hier als U'_k nach den beiden Richtungen QH und QI zerlegt wird. Die so erhaltenen Komponenten sind in H und I angreifend die beiden Kräfte H_k und I_k. H_k wird von der Kulisse aufgenommen und I_k wird nach K weitergeleitet und tritt hier als die Kraft K_k auf. K_k, I_k, H_k, L_k, M_k, N_k und O_k sind dann die

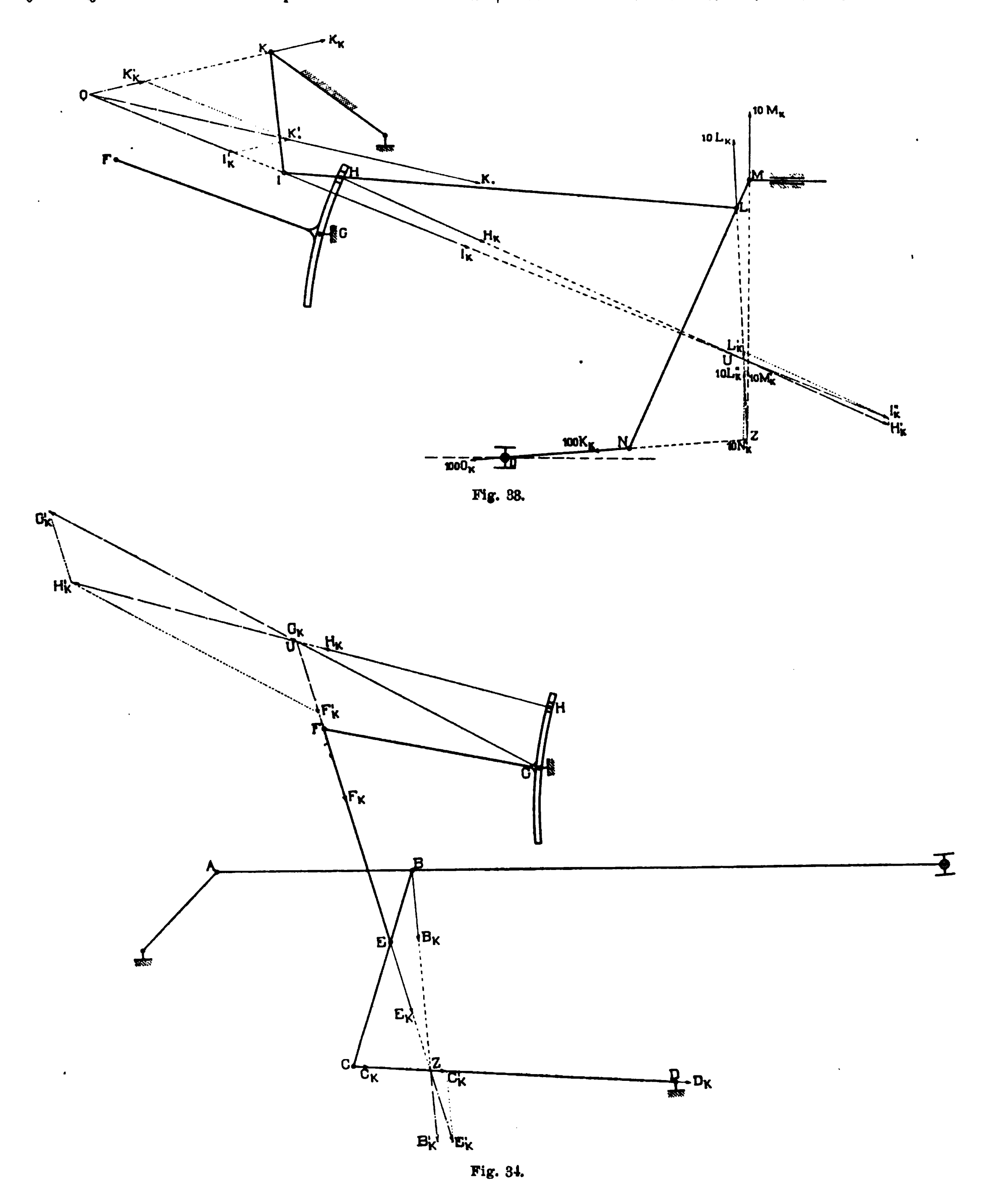


Fig. 33.

Fig. 34.

Die erstere Komponente U_k muss die Richtung UQ haben, denn nur dann lässt sie sich im Punkte Q nach den für I_k und H_k vorgeschriebenen Richtungen zerlegen. Die zweite Komponente L'_k wird nach L verlegt die Kraft L_k sein. L_k wird nach M und N weitergeleitet. Man verlegt L_k als L''_k nach dem Punkte Z und zerlegt es da in M'_k und N'_k. M'_k hat die Richtung ZM und wird nach M versetzt die Kraft M_k sein. N'_k hat die Richtung ZNO und ist nach N versetzt die Kraft N_k, die durch die Stange NO nach O weitergeleitet wird und hier als die Kraft O_k angreift. In der Figur sind diese letzten beiden Werte der Deutlichkeit wegen in zehnfacher Grösse eingezeichnet worden. Von der Zerlegung der Kraft K'_0 ist noch die Komponente U_k übrig, die nach dem Punkte in dieser Figur gesuchten Kräfte, die von der dynamischen Wirkung der bewegten Stange IL herrühren.

Fig. 33. K_0 ist die Trägheitskraft der Stange IK. Es soll die Verteilung dieser Kraft auf die Gelenkpunkte K, I, H, L, M, N und O bestimmt werden. Die Richtungen der Kräfte H_k, L_k, M_k, N_k und O_k sind die gleichen und werden nach denselben Gesichtspunkten bestimmt wie in der vorigen Figur. Die Richtung von I_k ist noch zu bestimmen. I_k greift mit den Kräften H_k und L_k an der Schubstange IL an. Da mit diese im Gleichgewicht ist müssen sich die Richtungen der drei Kräfte I_k, H_k und L_k in einem Punkte schneiden. Der Schnittpunkt der beiden bekannten Richtungen von H_k und L ist U. Somit ist UI die Richtung von I_k. I_k und K^0

sind Kräfte der Stange KI, die sich im Punkte Q schneiden. Da die Stange im Gleichgewicht ist, muss die dritte an IK angreifende Kraft K_k durch diesen Schnittpunkt Q gehen. Man versetzt deshalb K_0 nach Q und zerlegt es in die beiden Komponenten K'_k und I'_k. K'_k wird nach K verlegt die gesuchte Kraft K_k sein. I'_k im Punkte I angreifend ist die Kraft I_k und wird nach H und L weitergeleitet. Man verlegt deshalb I_k nach U und zerlegt es in die Komponenten H'_k und L'_k. H'_k wird nach H versetzt und gibt die von der Kulisse aufgenommene Kraft H_k. L_k nach L verlegt ist die Gelenkkraft L_k, die jedoch nach M und N weitergeleitet wird. Man zerlegt L_k als L''_k im Punkte Z in die beiden Komponenten M'_k und N'_k. Erstere nach M versetzt ist die gesuchte Kraft M_k, und letztere verlegt man nach N und O. Das gibt die beiden Kräfte N_k und O_k. O_k wird vom Kreuzkopf aufgenommen. Die gesuchten Kräfte an den Gelenken sind somit K_k, I_k, H_k, L_k, M_k, N_k und O_k

Gemäss den Konstruktionen in den Fig. 29—32 wird an jedem Gelenkpunkte eine an ihm angreifende materielle Kraft gefunden. Werden diese Einzelkräfte an jedem Punkt geometrisch addiert, so erhält man resultierende Kräfte, die die Massenwirkungen der Stangen IK, IL, MN und NO ersetzen. Die Resultierende im Punkte O wird vom Kreuzkopf aufgenommen und wird da Arbeit spendend oder aufzehrend wirken. Die Resultierende im Punkte H, die mit H_k bezeichnet sei, wird durch das übrige Getriebe nach der Kurbel hin weitergeleitet. In welcher Weise dies bis zu dem auf der Triebstange liegenden Punkte B geschieht, soll in der folgenden Figur gezeigt werden.

Fig. 34. Die Kraft H_k ist gegeben und wird durch das Getriebe $GFEDB$ nach B übertragen. Die dabei in den einzelnen Gelenkpunkten auftretenden Kräfte sollen bestimmt werden. H_k greift im Punkte H an dem um G drehbaren System des Hebels FG und der Kulisse GH an, und wird im Punkte F durch die Stange FE weitergeleitet. Diese Stange kann nach E hin nur eine Kraft in ihrer Richtung FE übertragen. Damit das System FGH im Gleichgewicht ist, müssen die Richtungen von F_k, G_k und H_k sich in einem Punkte schneiden. Man bringt deshalb die beiden bekannten Richtungen von F_k und H_k zum Schnitt und verbindet diesen Schnittpunkt U mit G. UG ist die Richtung von G_k. Man verlegt die Kraft H_k nach U und zerlegt sie hier in die beiden Richtungen UG und UF. Die erhaltenen Komponenten werden nach G und F versetzt, in welchen Punkten sie die gesuchten Kräfte G_k und F_k sind. F_k wird ihrer ganzen Grösse nach durch die Stange FE nach E übertragen und ist in diesem Punkte die Kraft E_k. Von E wird die Kraft weitergeleitet nach C und B. Die Richtung der Kraft C_k kann nur die Stange CD selbst sein, da CD um D frei drehbar ist. Somit muss die Richtung der dritten an CB angreifenden Kraft B_k durch den Schnittpunkt Z der Richtungen der beiden anderen gehen. Man verlegt die Kraft E_k nach Z und zerlegt sie in die beiden Komponenten B'_k und C'_k. Erstere nach B verlegt ist die Kraft B_k, und letztere nach C und D versetzt gibt die Kräfte C_k und D_k. Danach sind die Kräfte in den Gelenkpunkten, die durch Weiterleiten der Kraft H_k nach B auftreten: G_k, F_k, E_k, C_k, D_k und B_k.

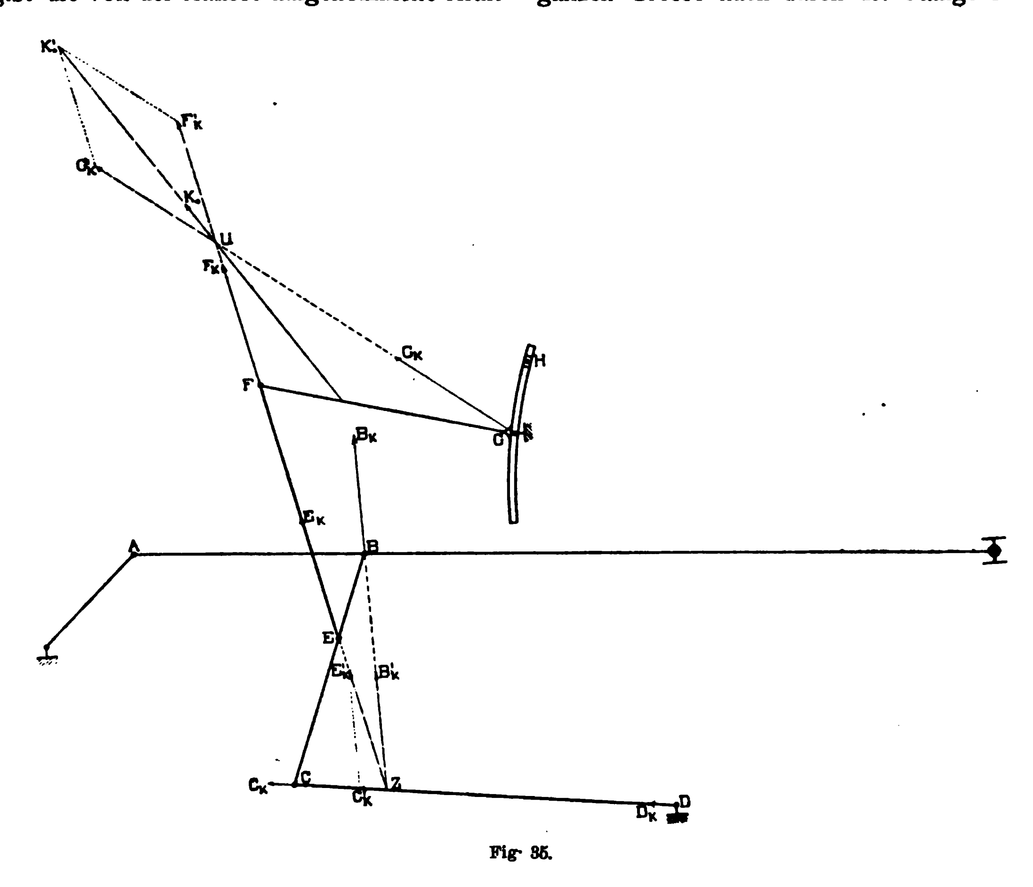


Fig. 35.

Fig. 35. K_0 ist die Trägheitskraft des um G rotierenden Systems des Hebels FG mit der Kulisse GH. Diese Trägheitskraft setzt sich abweichend von der Fig. 29b aus drei Komponenten zusammen, die einzeln nach Fig. 28 bestimmt werden; nämlich aus der Trägheitskraft des Hebels FG und aus den beiden Trägheitskräften der zwei Kulissenhälften. K_0 ist die Resultierende dieser drei Komponenten und damit die Trägheitskraft des ganzen Systems von Hebel und Kulisse. Man begeht dabei keinen merklichen Fehler, wenn man die Kulissenkrümmung vernachlässigt und sich den Kulissenbogen durch eine Gerade ersetzt denkt, auf der die Masse der Kulisse gleichmässig verteilt ist. In der vorliegenden Figur ist K_0 gegeben, und es soll die Verteilung dieser Kraft auf die Gelenkpunkte des Getriebes $GFECDB$ untersucht werden. Von E nach F kann nur durch die Stange FE eine Kraft übertragen werden, weshalb EF die Richtung von F_k sein

muss. Man verlegt deshalb K_0 nach dem Schnitt U von K_0 mit der Richtung von F_k. Durch diesen Schnittpunkt U muss die Richtung der Kraft von G_k gehen, damit das System $F\,G\,H$ im Gleichgewicht ist. im Punkte U wird $K'_0 = K_0$ in die beiden Komponenten F'_k und G'_k zerlegt, die in ihren Richtungen nach F und G versetzt die gesuchten Kräfte F_k und G_k geben. F_k wird durch die Stange $F\,E$ nach E übertragen, weshalb $E_k = F_k$ ist. Die Kraft E_k wird nach B und C weitergeleitet. Wie in Fig. 35 kann auch hier C nur eine Kraft aufnehmen von der die Kräfte F_k und G_k. Letztere wird in ihrer Richtung nach E verlegt, an welchem Punkte sie die Kraft E_k darstellt. Wie in Fig. 34 und 35 wird E_k nach C und B weitergeleitet. Die Richtung von C_k ist wieder durch die Linie $C\,D$ vorgeschrieben, weshalb man E_k nach dem Schnittpunkt Z der Richtung von E_k und der Richtung von C_k verlegt. Die Richtung der Kraft B_k muss dann $Z\,B$ sein. Man zerlegt $E'_k = E_k$ in die beiden Komponenten C'_k und B'_k, die nach C, D bezw. B verlegt die gesuchten Kräfte C_k, D_k und B_k geben.

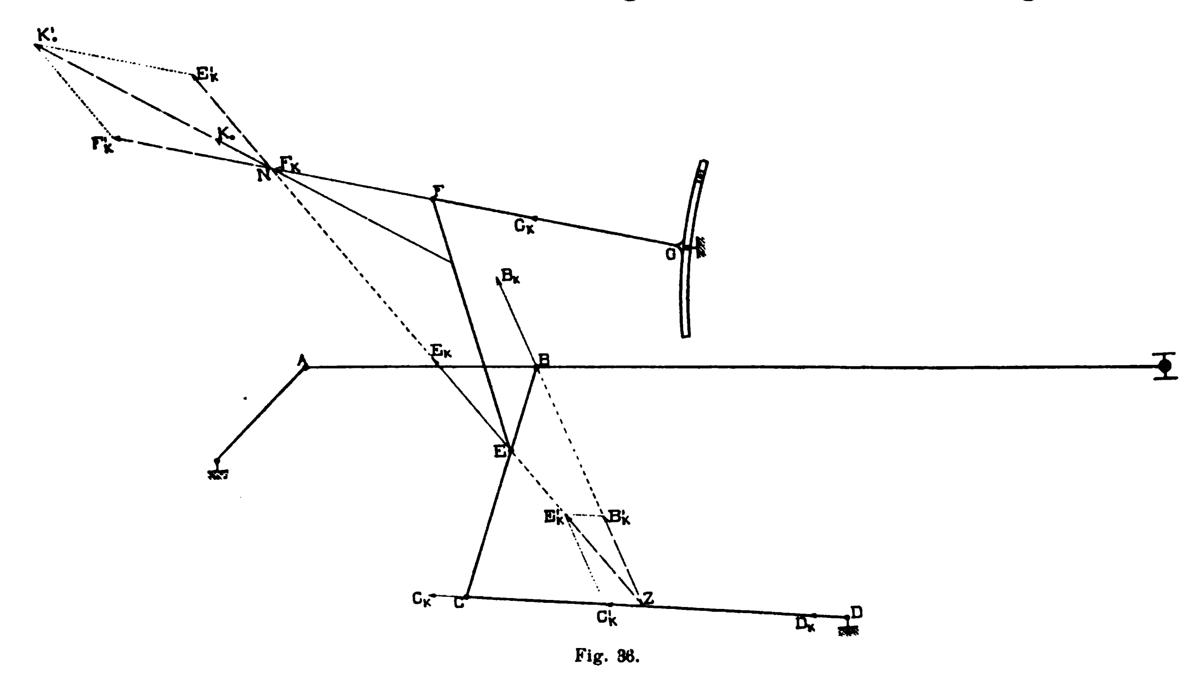


Fig. 36.

Richtung $C\,D$, weshalb man E_k bis zum Schnitt Z mit dieser Richtung verlegt und da in die Komponenten C'_k und B'_k zerlegt. C'_k nach C und D versetzt gibt die gesuchten Kräfte C_k und D_k. B'_k, dessen Richtung durch $Z\,B$ bestimmt ist, wird nach B versetzt und ist hier die Fig. 37. K_0 ist die Trägheitskraft des Hebels $C\,D$. Es soll die Uebertragung derselben nach dem Punkte B bestimmt werden. Die im Gelenk C auftretende Kraft muss durch die Stange $B\,C$ nach B weitergeleitet werden. Es kann also C nur eine Kraft in der Richtung $B\,C$ auf-

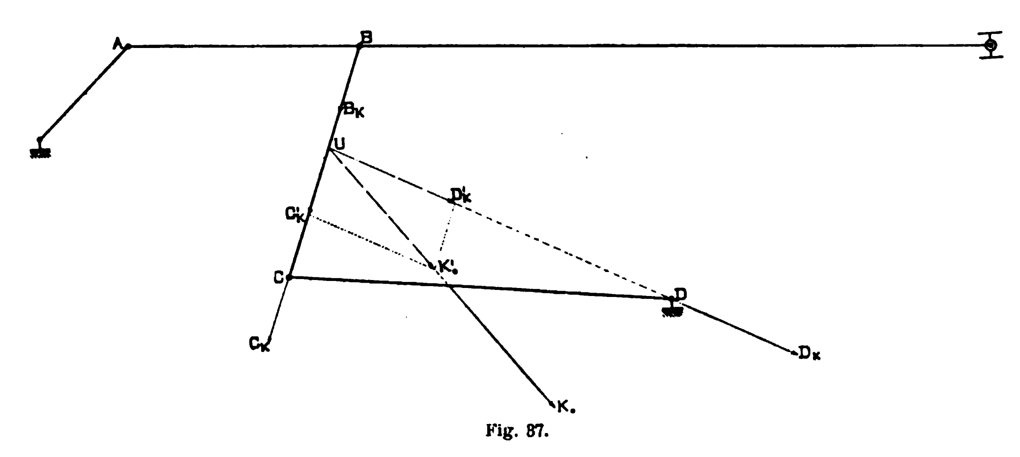


Fig. 37.

Kraft B_k. Es sind dann G_k, F_k, E_k, C_k, D_k und B_k die gesuchten Kräfte, die von der dynamischen Wirkung des bewegten Systems $F\,G\,H$ herrühren.

Fig. 36. Gegeben ist die Trägheitskraft K_0 der Stange $E\,F$. Es soll die Verteilung derselben auf die Gelenkpunkte G, F, E, C, D und B bestimmt werden. Damit die Stange $E\,F$ im Gleichgewicht bleibt, müssen die drei Kräfte E_k, K_0 und F_k sich in einem Punkte schneiden. Die Richtung der Kraft F_k kann nur der Hebel $F\,G$ sein, denn $F\,G$ ist um G frei drehbar und deshalb kann F nur eine Kraft in Richtuug $F\,G$ aufnehmen und nach G weiterleiten. Man verlegt K_0 nach dem Schnittpunkt N mit der Richtung von F_k, und zerlegt es in die Komponenten F'_k und E'_k. Erstere wird nach F und G versetzt und gibt nehmen. Damit die Stange $C\,D$ im Gleichgewicht ist, muss die Richtung der dritten Kraft D_k durch den Schnittpunkt U der beiden andern Kraftrichtungen gehen. Man zerlegt $K'_0 = K_0$ im Punkt U in die beiden Komponenten C'_k und D'_k nach den Richtungen $U\,C$ und $U\,D$. C'_k und D'_k nach C und D verlegt geben die gesuchten Kräfte C_k und D_k. C_k wird durch die Stange $B\,C$ nach B weitergeleitet und greift an diesem Punkte als die gesuchte Kraft B_k an.

Fig. 38. Gegeben ist die Trägheitskraft K_0 der Stange $B\,C$. Es soll die Uebertragung dieser Kraft nach dem Punkte B bestimmt werden. Der Hebel $C\,D$ kann nur eine Kraft in der Richtung $C\,D$ aufnehmen, da er um D frei drehbar ist. Die Richtungen von K_0 und C_k schnei-

den sich im Punkte U, durch den auch die Richtung von B_k gehen muss wenn CD im Gleichgewicht sein soll. Man verlegt K_0 nach U und zerlegt es in die beiden Komponenten C'_k und B'_k, die in ihren Richtungen nach C und B verlegt die gesuchten Kräfte C_k und B_k sind. C_k wird durch die Stange CD nach D weitergeleitet und von diesem festen Punkte als die Kraft D_k aufgenommen.

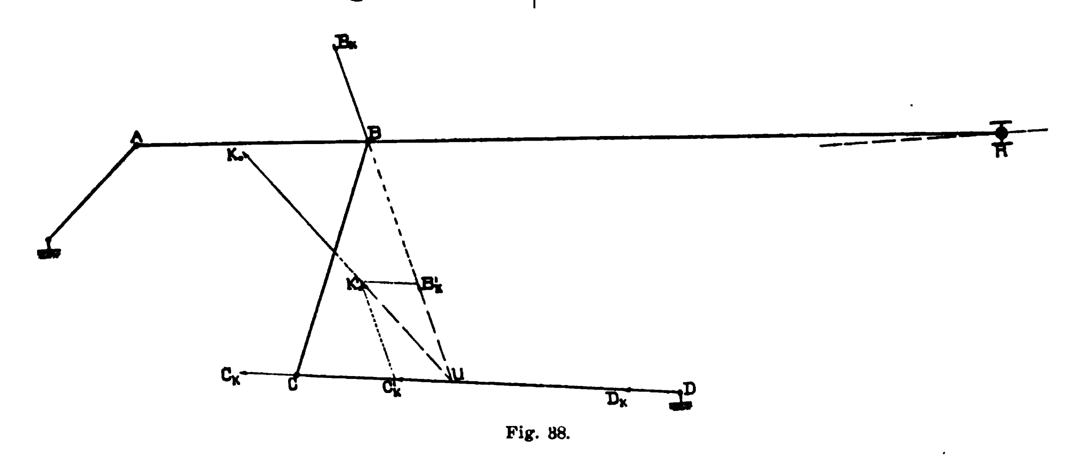


Fig. 38.

In den vorstehenden Fig. 30—38 wurden die an den Gelenken, Drehpunkten und der Kulisse angreifenden Kräfte bestimmt, welche die dynamische Wirkung einer Stange eines Hebels oder wie in Fig. 34 eines Teils des Steuerungsgetriebes ersetzen. Es ergaben sich an jedem Punkte eine Reihe von Einzelkräften, die nicht immer die gleiche Richtung haben. Durch geometrische Addition der Einzelkräfte wird an jedem der betreffenden Punkte eine resultierende Kraft gefunden, die von der Massenwirkung des ganzen bewegten Steuerungsgetriebes, ausschliesslich der Schieberstange und des Schiebers herrührt. Diese letztere soll in einer späteren Figur für jeden Gelenkpunkt eigens bestimmt werden, da sie als die grösste vorkommende Massenkraft ein besonderes Interesse beanspruchen kann.

— Obwohl Kurbel und Kreuzkopf nicht mehr zum Steuerungsmechanismus gerechnet werden können, liegt doch die Beantwortung der Frage nahe, wie sich die Gelenkkraft in B auf Kurbel und Kreuzkopf verteilt. An beiden sind bereits Kräfte vorhanden, und zwar am Kreuzkopfzapfen die Kolbenkraft, die in O angreifende Massenkraft O_k, die Massenkraft des Kolbens und andere. Die Resultierende P all dieser Kräfte, die mit dem Namen Kreuzkopfkraft bezeichnet sei, wird von der in B angreifenden Kraft B_k unabhängig sein. An der Kurbel wirkt die durch die Schubstange vom Kreuzkopf her übertragene Stangenkraft S. Es ist deshalb zu untersuchen in welcher Weise diese Kräfte P und S durch die dynamische Wirkung der Steuerung eine Aenderung erleiden.

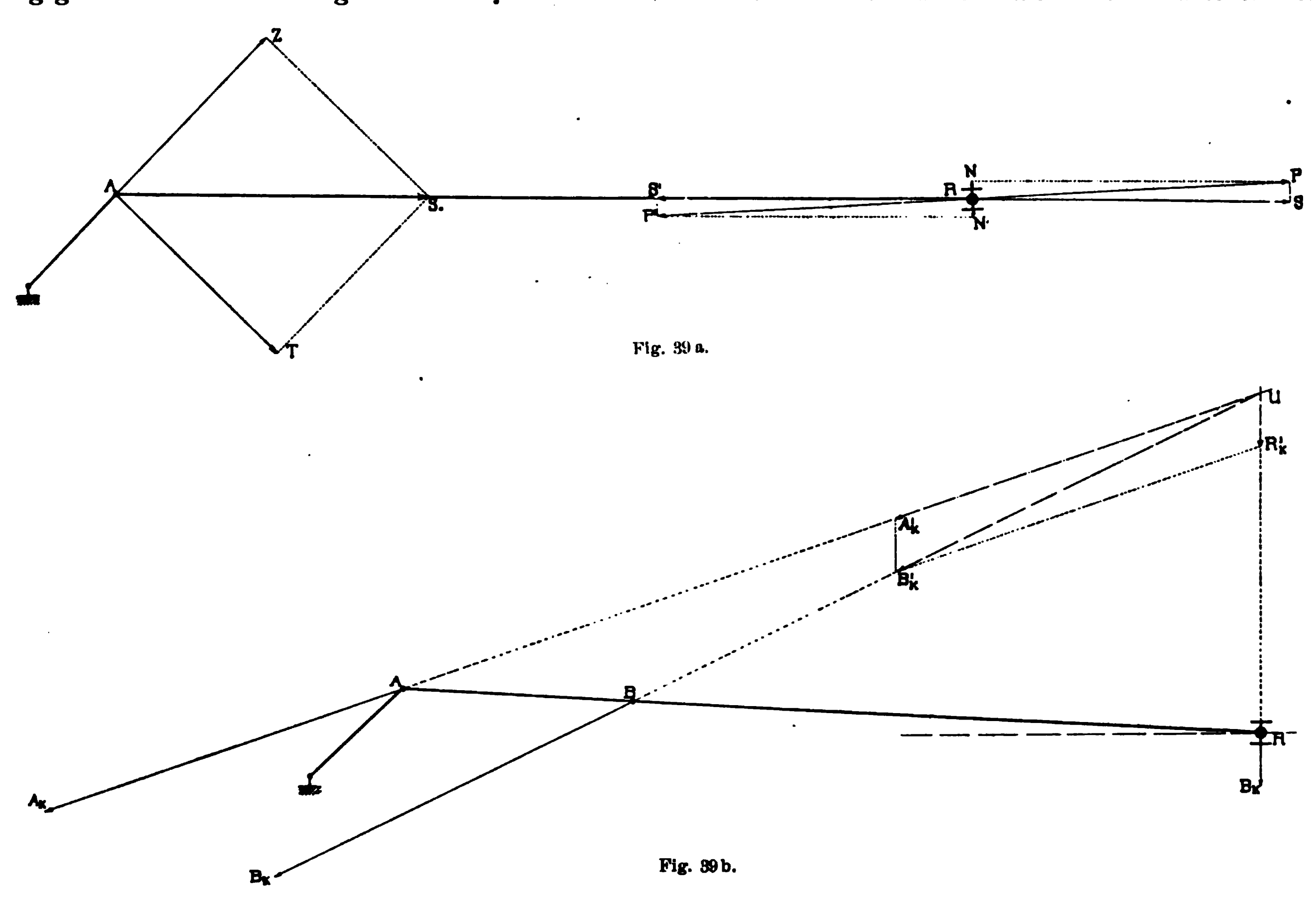


Fig. 39 a.

Fig. 39 b.

Es sei in Fig. 39a P die Kreuzkopfkraft und $S = S_0$ die Stangenkraft, die sich am Kurbelzapfen in den Zapfendruck Z und die Drehkraft T zerlegt. Der Kreuzkopf ist nur dann im Gleichgewicht, wenn die Summe P' der Reaktionen am Kreuzkopf gleich der Kraft P ist. Diese Kraft P ist von einer an der Triebstange angreifenden Kraft unabhängig und da P' stets $= P$ sein muss, wird auch

P' durch B_k nicht beeinflusst. Dies ist nur der Fall, wenn die von B_k herrührende an R angreifende Kraft ein Normaldruck ist, also senkrecht zur Gleitbahn steht.

Fig. 39b. Gegeben ist die an B angreifende Kraft B_k. Es soll die Verteilung von B_k nach A und R untersucht werden. Damit die Triebstange im Gleichgewicht ist, müssen die drei Kräfte A_k, B_k und R_k sich in einem Punkte schneiden. Die Richtung von R_k ist nach Fig. 39a gegeben, und ist ein Lot im Punkte R zur Kreuzkopfgleitbahn. Man verlängert deshalb B_k bis zum Schnitte U mit der Richtung von R_k und zerlegt in U die Kraft B'_k in die beiden Komponenten A'_k und R'_k, die nach A und R verlegt, dort die gesuchten Kräfte A_k und B_k geben.

wichtes weitergeleitet werden kann. K_0 wird in die beiden Komponenten K'_0 und K''_0 zerlegt. Die letztere wird von der Schieberstangenführung aufgenommen. Die erstere K'_0 wäre nach dem Schnittpunkte W zu verlegen und da in zwei Komponenten von den Richtungen WL und WN zu zerlegen, die ihrerseits wieder nach L und N versetzt die Kräfte L_k und N_k geben würden. Der Schnittpunkt W liegt aber im allgemeinen sehr weit entfernt und die Zerlegung von K'_0 in W würde ein ungenaues Resultat liefern, da die Richtungen der Komponenten sich sehr flach schneiden. Aus diesem Grunde ist hier die rechnerische Behandlung der Konstruktion von L_k und N_k vorzuziehen. Um L_k zu bestimmen, fällt man von N das Lot Nm auf

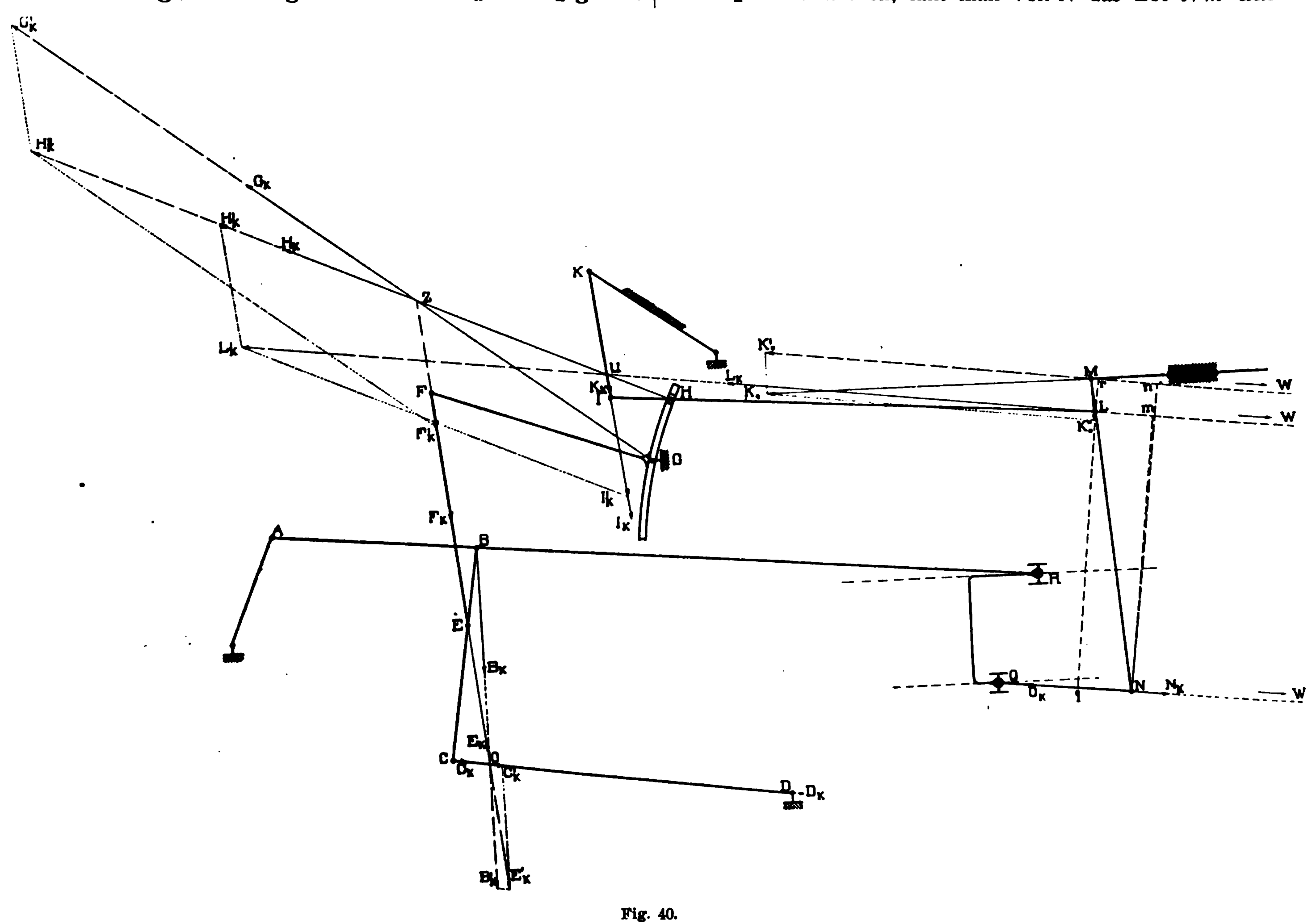


Fig. 40.

Fig. 40. Es erübrigt nun noch die dynamische Wirkung der auf einer geraden Bahn bewegten Massen des Schiebers und der Schieberstange auf die Gelenkpunkte der Steuerung zu bestimmen. Wie schon erwähnt, soll diese Aufgabe eigens behandelt und die hierbei gefundenen Werte gesondert angegeben werden um den Einfluss dieser grössten vorkommenden Trägheitskraft erkennen zu können.

Gegeben ist $K_0 = M \cdot M_j$, wobei M die Masse von Schieber und Schieberstange und M_j die Beschleunigung dieser Masse ist. Es wird zuerst die Richtung von L_k bestimmt, die derart sein muss, dass sie durch den Schnittpunkt U der aus den Erläuterungen in Fig. 30 bekannten Richtungen der Kräfte I_k und H_k gehen muss; denn nur dann lässt sich in U die Kraft L'_k nach diesen Richtungen zerlegen. Die Richtung der Kraft N_k kann nur die Linie NO sein, da der Hebel NO um O frei drehbar ist. Die Richtungen NO und UL schneiden sich im Punkte W, der mit dem Punkt M verbunden die Richtung der Kraft K'_0 gibt, die nach L und N ohne Störung des Gleichge-

die Richtung von L_k und das Lot Nn auf die Richtung von K'_0. Dann muss sein:

$$L_k = K'_0 \cdot \frac{Nn}{Nm}.$$

Um N_k zu bestimmen, fällt man von L das Lot Lq auf die Richtung von N_k und das Lot Lr auf die Richtung von K_0. Dann muss sein:

$$L_k = K'_0 \cdot \frac{Lr}{Lq}.$$

N_k wird durch die Mitnehmerstange NO nach O weitergeleitet und ist im Punkte O angreifend die Kraft O_k. L_k wird nach H und I übertragen. Man verlegt deshalb L_k nach U und zerlegt es in die beiden Komponenten N'_k und I_k. Letztere wird nach I versetzt die Kraft I_k geben, die durch die Hängestange KI nach K weitergeleitet wird und in K angreifend die Kraft K_k ist. Die am Stein H wirkende Kraft H_k wird von der Kulisse aufgenommen und durch das Getriebe $GFECDB$ nach B

übertragen. In welcher Weise dies geschieht, ist in Fig. 34 gezeigt. Die weitere Verteilung der im Punkt B angreifenden Kraft auf Kurbelzapfen und Kreuzkopf wird nach Fig. 39b durchgeführt.

Nach diesen vorstehenden Konstruktionen können in der zu untersuchenden Steuerung für jede durch eine Kurbelstellung bedingte Lage des Steuerungsgetriebes Geschwindigkeit und Beschleunigung jedes ausgezeichneten Punktes desselben und die durch die letztere hervorgerufenen Massendrücke an den Gelenken bestimmt werden. Um ein genaues Bild dieser veränderlichen Werte zu haben, ist es notwendig, ihre Bestimmung sowohl für eine grössere Anzahl von Kurbelstellungen als auch für mehrere Steinstellungen durchzuführen, da für jede neue Steinstellung die Bewegung der Punkte M, N, L, H und I eine andere sein wird. Von praktischer Bedeutung sind hauptsächlich diejenigen Steinstellungen, welche die grössten Werte für Geschwindigkeit, Beschleunigung und Kraft ergeben. Voraussichtlich wird dies eine der beiden Steinstellungen sein, bei denen der Stein sich in bezug auf die Kulisse in seiner Endlage befindet, wenn also der Steuerhebel voll ausgelegt ist. Es ist dabei angenommen, dass die Steinlagen N symmetrisch zum Kulissenaufhängepunkt G liegen, wenn die Kurbel in der Totlage ist. Von vornherein zu sagen, für welche Steinlage — ob für die oberste, die dem Vorwärtsfahren entspricht, oder für die unterste, die dem Rüchwärtsfahren der Maschine entspricht — Geschwindigkeit, Beschleunigung und Massendruck am grössten wird, ist unmöglich. Die Steuerung ist demgemäss bei beiden Steinstellungen zu untersuchen, wobei es wichtig ist, aus dem Ergebnis der Untersuchung zu sehen, dass die Unterschiede in den Ergebnissen für oberste und unterste Steinstellung keine nennenswerten sind. Eine weitere ausgezeichnete Steinstellung ist noch die mittlere, d. h. jene, bei welcher der Stein vom Springen abgesehen, mit G zusammnnfällt und in bezug auf die Kulisse in Ruhe bleibt. Von dieser Mittelstellung lässt sich ohne weiteres sagen, dass für sie die Geschwindigkeiten, Beschleunigungen und Kräfte nicht grösser werden, als bei den Endlagen des Steins. Für einige besondere Punkte ist auch die Bewegung des Getriebes bei der mittleren Steinstellung untersucht worden, um zu zeigen, dass sie ähnlich verläuft, wie bei den Endlagen des Steins. Die Bewegungen der Punkte A, B, R, C, E und F sind für alle Steinlagen die gleichen und die Bewegung der Punkte I, N, L, M und N wird bei der Mittelstellung des Steins vorwiegend ihrer Grösse nach eine andere sein; sie wird kleinere Werte für Geschwindigkeit und Beschleunigung ergeben als die Bewegung bei den Endlagen des Steins. Es ist somit anzunehmen, dass alle, zwischen Mittel- und Endstellung des Steins liegenden Steinstellungen keine besonders charakteristische Bewegung im Steuerungsgetriebe veranlassen

Zur Durchführung der vorliegenden Aufgabe wurde der Kurbelkreis in 16 gleiche Teile geteilt (Fig. 1). Jeder Teilpunkt bezeichnet eine ganz bestimmte Kurbelstellung, für die man die Lage jedes Gelenkpunktes mit Hilfe von Zirkel und Lineal oder eines aus Papier gemachten Modells der Steuerung festlegt. Werden die einzelnen Lagen eines Gelenkpunktes untereinander zu einem steten Linienzug verbunden, so erhält man dadurch den Weg des betreffenden Punktes. Die Entfernungen zweier benachbarter Punkte, auf der krummen Bahn gemessen, sind die Wege des Gelenkpunktes bei gleichen Zeiten. In der Fig. 1 sind diese Bahnkurven für die oberste Steinstellung eingetragen. Die durch die Untersuchung der Steuerung für die angenommene Zuggeschwindigkeit $v = 120$ kg/Std. gefundenen Werte für Geschwindigkeit, Beschleunigung und Gelenkkraft sind in den Tab. 2—16 gesammelt, und zwar bezeichnet v die Geschwindigkeit des betreffenden Punktes in m f. d. Sek., j die Beschleunigung in m f. d. Sek.^{2}, j_t die Tangentialbeschleunigung in m f. d. Sek.^{2}, k' in kg die am betreffenden Punkte angreifende Kraft, welche die dynamische Wirkung der äusseren Steuerungsteile, nämlich des ganzen Steuergetriebes ausschliesslich Schieber und Schieberstange ersetzt, k'' in kg die Kraft, welche die dynamische Wirkung der inneren Steuerungsteile, nämlich Schieberstange mit Schieber ersetzt und k die Resultierende aus k' und k''. Die Normalbeschleunigung j_n ist nicht in die Tabellen aufgenommen, doch kann sie leicht berechnet werden aus der Gleichung

$$j_n^2 + j_t^2 = j^2,$$

die sich aus dem Umstand ergibt, dass die zusammengehörigen Werte der Beschleunigung, Tangentialbeschleunigung und Normalbeschleunigung ein rechtwinkliges Dreieck bilden. Ausserdem gestatten die Tabellen noch eine Berechnung des Krümmungshalbmessers r, der momentan von dem betreffenden Punkte durchlaufenen Bahnkurve; denn es muss nach einer früher gegebenen Gleichung sein

$$j_n = \frac{v^2}{r} \text{ oder } r = \frac{v^2}{j_n}.$$

In den Fig. 41 — 58 sind die Werte der Geschwindigkeiten und der Tangentialbeschleunigungen der Gelenkpunkte für jeden einzelnen der Gelenkpunkte als Ordinaten zu den Wegen der Gelenkpunkte als Abscissen aufgetragen, wodurch Kurven entstehen, die eine genaue Uebersicht über den Verlauf der Bewegung des betreffenden Punktes ermöglichen. Die Geschwindigkeit wurde stets von der Abscissenachse aus nach oben aufgetragen, was bei einer fortlaufenden Bewegung eines Punktes auf einer geschlossenen Bahn selbstverständlich ist. Bei einer schwingenden Bewegung jedoch liegt es nahe, den Drehsinn durch Auftragen der Geschwindigkeit nach beiden Seiten der Abscissenachsse zu kennzeichnen. Betrachtet man aber eine schwingende Bewegung als eine fortlaufende, der zweifach zu rechnenden Bahn des Punktes, so muss auch hier die Geschwindigkeit stets nach oben aufgetragen werden, was im vorliegenden Fall auch geschehen ist. Die Tangentialbeschleunigung wird nach oben aufgetragen, wenn sie ein Wachsen der Geschwindigkeit andeutet, und nach unten, wenn sie als Verzögerung auftritt. Die Tangentialbeschleunigungskurve schliesst mit der Abscissenachse eine bestimmte Fläche ein, die teilweise oberhalb und teilweise unterhalb der Abscissenachse liegt. Bezeichnet man die erstere als positiv und die letztere als negativ, so muss bei richtiger Bestimmung der Bewegung des betreffenden Punktes die algebraische Summe dieser Flächen gleich 0 sein; oder es muss die Fläche oberhalb der Achse gleich der Fläche unterhalb der Achse sein. Bei der untersten Steinstellung wird die in der arbeitenden Lokomotive eingebaute Kurbel eine andere Drehrichtung haben als bei der obersten. Die Wegkurven werden in der Reihenfolge 0, 15, 14, 13 . . . von den Gelenkpunkten durchlaufen. Würde man die Tabellen und Kurven dieser umgekehrten Drehrichtung anpassen, so würde das den Vergleich der Bewegungs- und Kraftverhältnisse bei oberster und unterster Steinstellung erschweren. Es sei deshalb die Annahme getroffen, dass auch bei der untersten Steinstellung die Kurbel eine Rechtsdrehung ausführe. Dadurch wird an Grösse und Richtung der Beschleunigungen und Kräfte nichts geändert; nur die Geschwindigkeitsrichtung wird eine entgegengesetzte gegenüber der Wirklichkeit. Demnach wird, was in der Zeichnung, den Kurven und den Tabellen als Tangentialbeschleunigung auftritt, nun eine Verzögerung und umgekehrt. Besondere charakteristische Merkmale oder unregelmässigen Verlauf bringen die in den Fig. 41—58 gezeichneten Geschwindigkeits- und Beschleunigungskurven nicht. Erwähnenswert ist es, dass der Hub des Schiebers, das ist der Weg

Fig. 41.

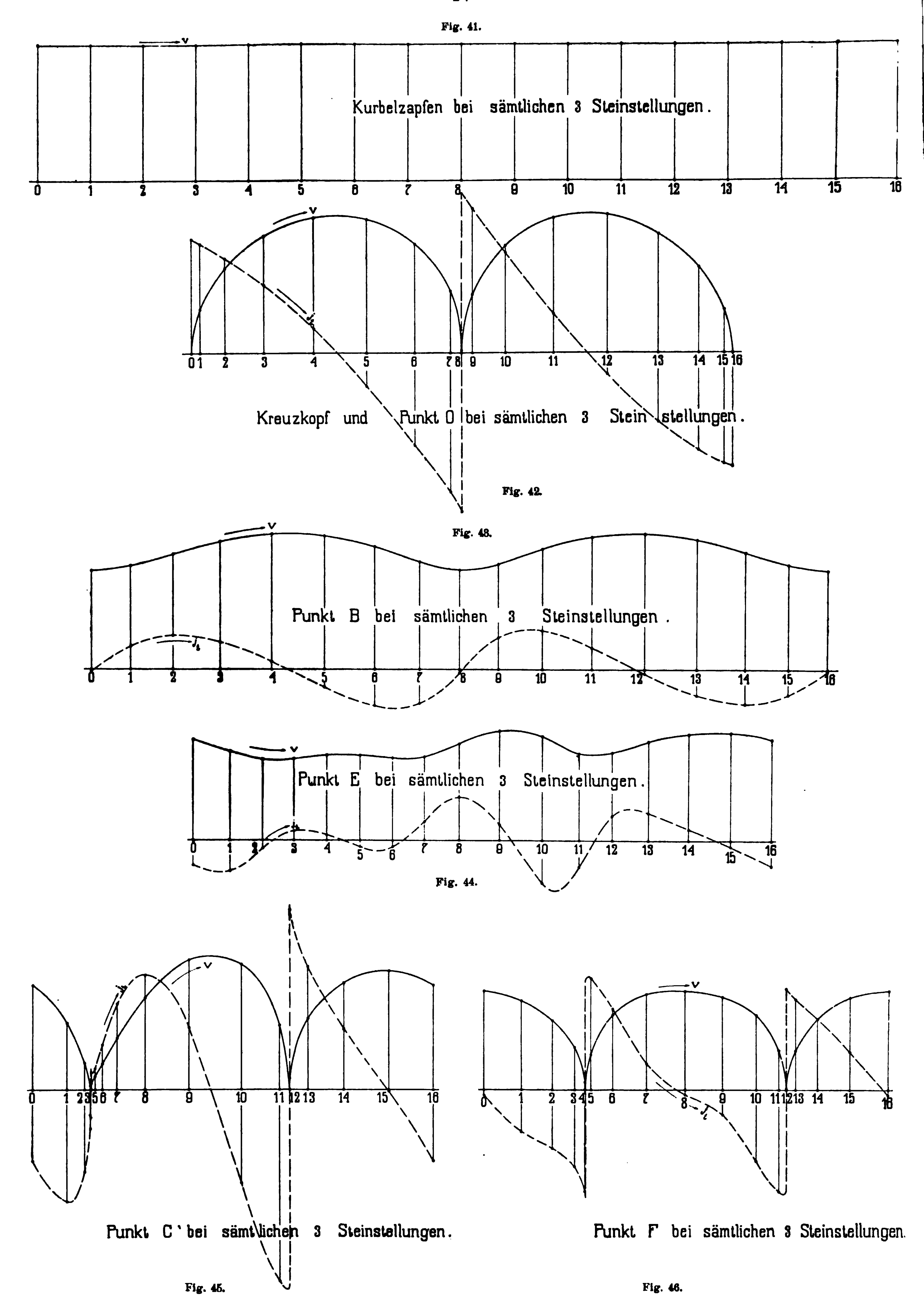


Fig. 42.

Fig. 43.

Fig. 44.

Fig. 45.

Fig. 46.

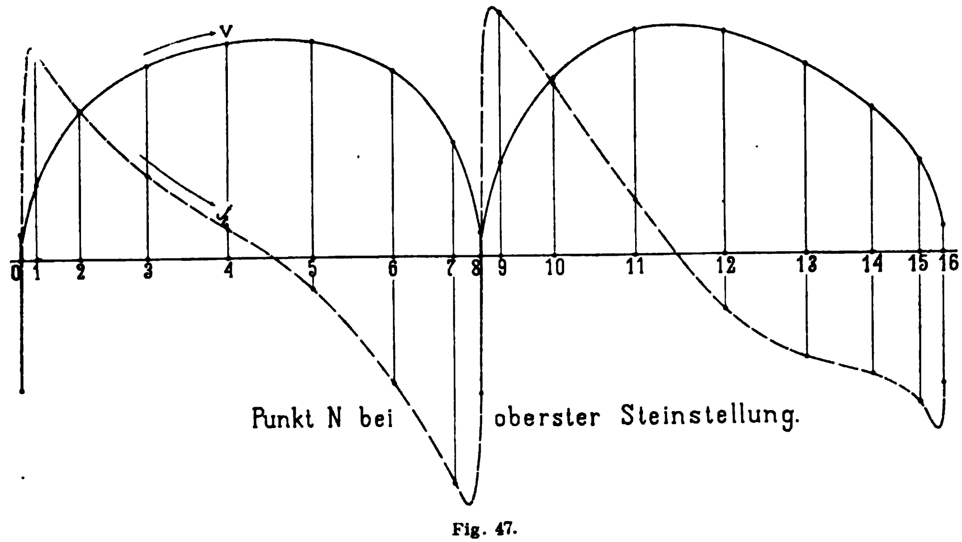


Fig. 47.

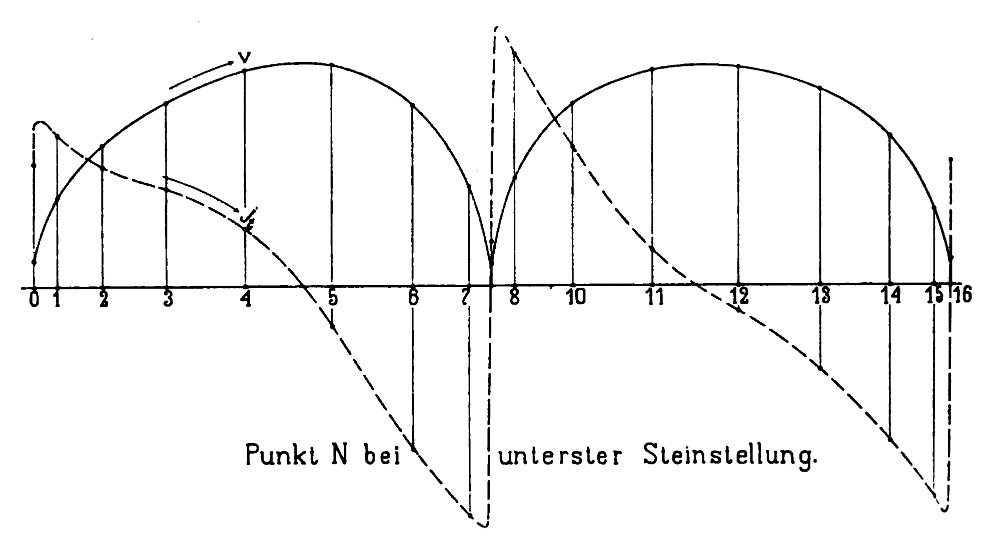


Fig. 48.

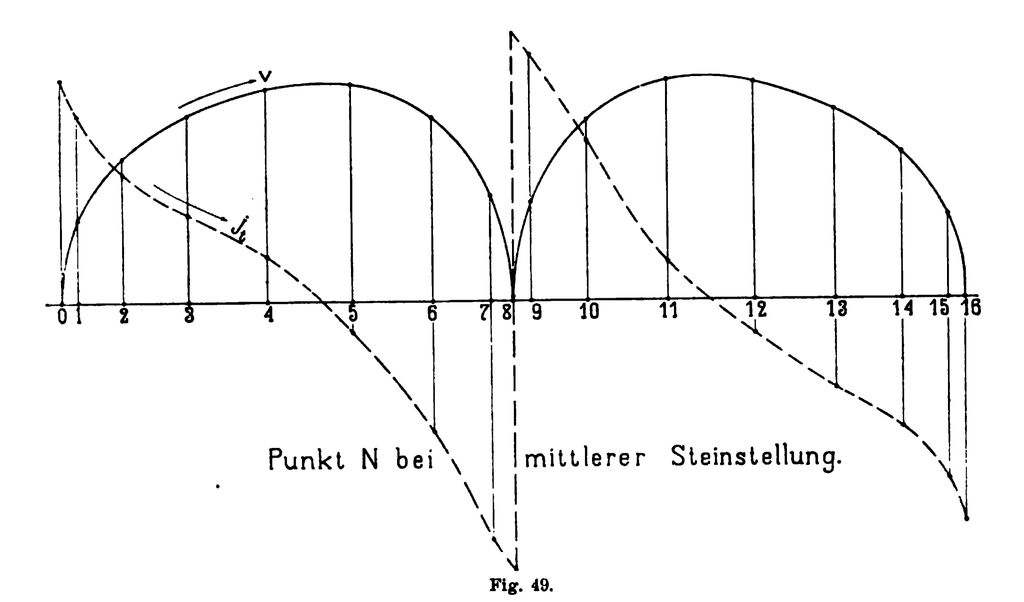


Fig. 49.

0 2 4 6 8 10 12 14 16

Punkt M bei mittlerer Steinstellung.

Fig. 58.

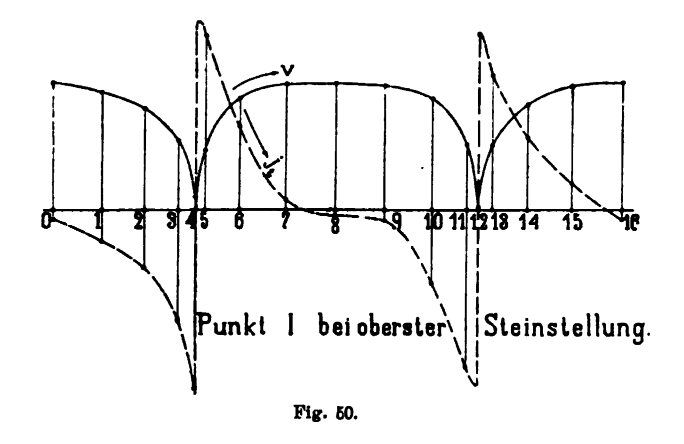


Fig. 50.

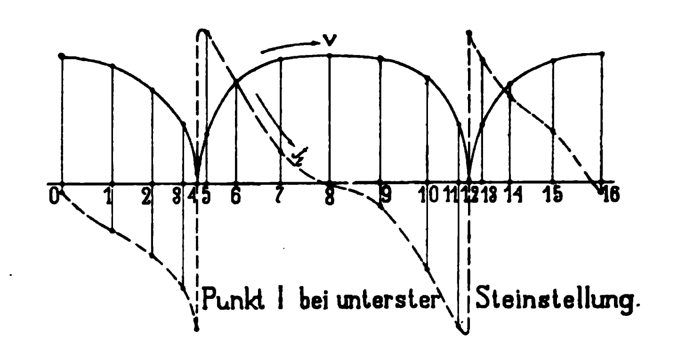


Fig. 51.

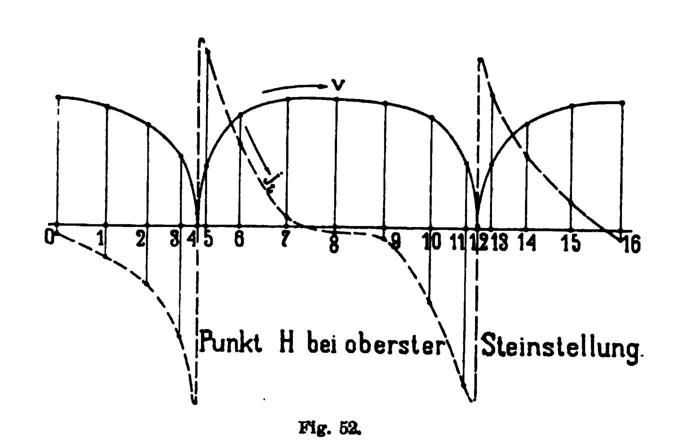
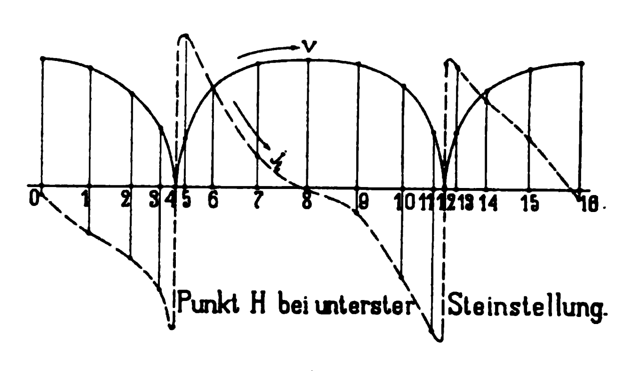


Fig. 52.



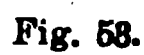


Fig. 53.

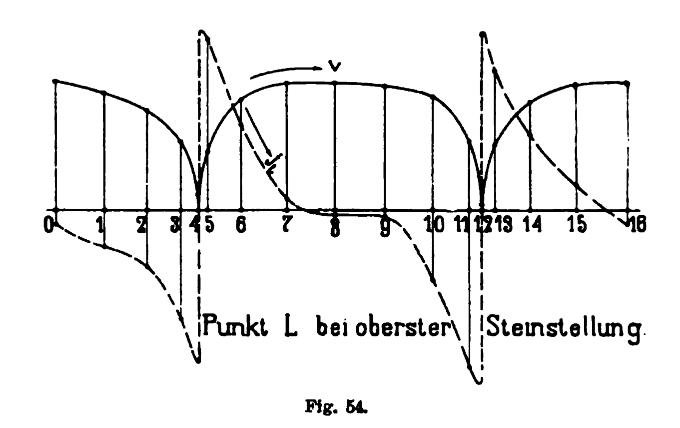


Fig. 54.

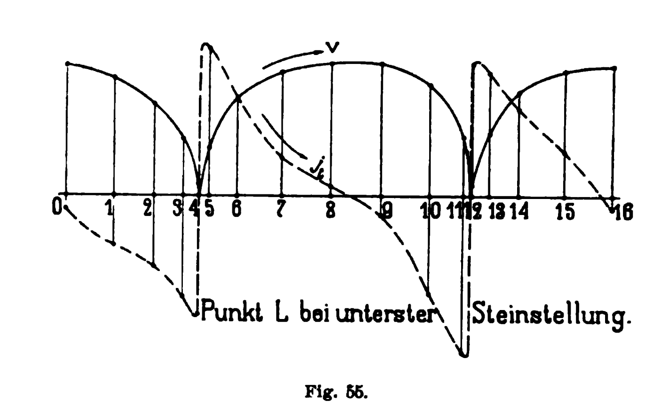


Fig. 55.

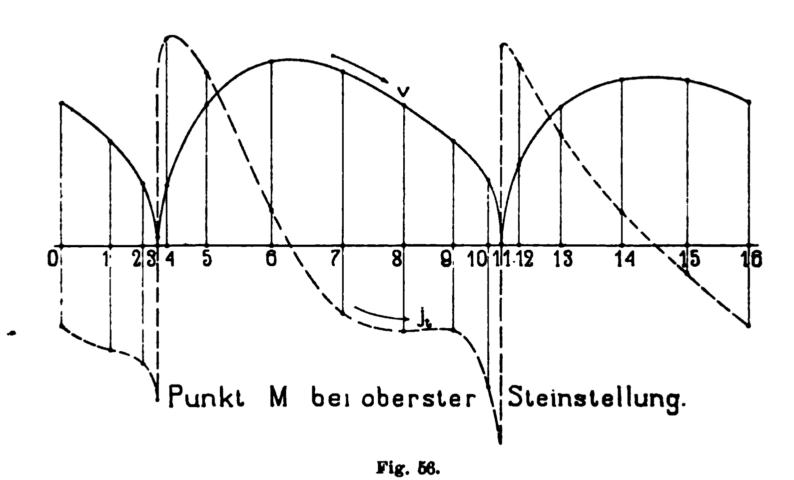


Fig. 56.

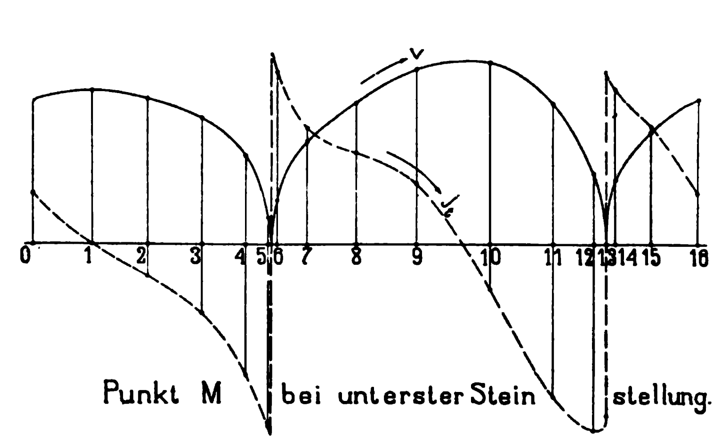


Fig. 57.

des Punktes M bei der obersten Steinstellung grösser ist, als bei der untersten. Dies erklärt sich aus der Veränderung der Grösse GH beim Ausschlagen der Kulisse.

Auch für die Richtigkeit der Konstruktion der Kräfte ist wie für die der Beschleunigungen eine Kontrolle möglich, die sich aus der Bedingung ergibt, dass die Arbeit, die während einer Kurbeldrehung zur Erteilung der Beschleunigung der Massen der Steuerungsteile geleistet wird, gleich ist der Arbeit, welche durch die Verzögerung dieser Massen erhalten wird; dass also die algebraische Summe der Arbeiten gleich Null ist, welche zur Erteilung der Bewegung an das ganze Steuerungsgetriebe während einer Kurbeldrehung geleistet werden. In dem vorliegenden Getriebe wird an zwei Gelenkpunkten Arbeit in das Steuerungsgetriebe eingeleitet, nämlich in dem Kreuzkopfpunkte O und in dem auf der Triebstange liegenden Punkte B. Es ist nicht notwendig, dass die oben ausgesprochene Bedingung für die algebraische Summe der während einer Kurbeldrehung eingeleiteten Arbeiten für jeden der Punkte, an welchem Arbeit eingeleitet wird, einzeln erfüllt ist. Es kann vielmehr die Arbeit während einer Kurbeldrehung an jedem der beiden Punkte einen bestimmten positiven oder negativen Wert annehmen; es muss aber die Arbeit an dem einen Gelenkpunkt gleich und entgegengesetzt der Arbeit an dem anderen Gelenkpunkt sein. Man kann nun eine Kontrolle der Richtigkeit der erhaltenen Kräfte in der Weise durchführen, dass man annimmt, die Arbeit zur Bewegung des ganzen Steuergetriebes werde von einem dritten Gelenkpunkte aus geleistet. Als ein solcher Punkt sei der Kurbelzapfen A angenommen. Man denkt sich also am Kurbelzapfen in jeder Kurbelstellung zwei Kräfte in Richtung der Geschwindigkeit des Kurbelzapfens wirkend, von denen die eine k_1 in jeder Kurbelstellung die gleiche Arbeit leistet, wie die Kraft B_k am Punkte B; während die andere k_2 in jedem Augenblick die gleiche Arbeit leistet, wie die Kraft O_k am Punkte O.

Diese Kräfte k_1 und k_2 können in einfacher Weise nach dem Prinzip der virtuellen Geschwindigkeiten für jede Kurbelstellung bestimmt werden. Es ist nämlich:

$$k_1 = B'_k \cdot \frac{B_v}{A_v} \text{ und } k_2 = O'_k \cdot \frac{O_v}{A_v},$$

wobei die Kräfte B'_k und O'_k Komponenten der Gelenkkräfte B_k und O_k an den Gelenkpunkten B und O sind, welche in die Richtung der Geschwindigkeit von B bezw. O fallen. k_1 ist aber auch diejenige Komponente der Gelenkkraft im Kurbelzapfen A, welche in die Richtung der Geschwindigkeit A_v des Punktes A fällt. Es ist deshalb zweckmässiger, k_1 in der Weise zu bestimmen, dass A_k auf die Richtung der Geschwindigkeit A_v des Punktes A projiziert wird.

Wenn eine Geschwindigkeit und eine Kraft den gleichen Richtungssinn haben, dann werde die Kraft als positiv bezeichnet; haben die beiden aber die entgegengesetzten Richtungen, dann werde die Kraft als negativ bezeichnet. Man streckt den Weg des Kurbelzapfens in eine Gerade, die Abscissenachse aus, und trägt dazu die nach obigem bestimmten Kräfte k_1 und k_2 als Ordinaten in der Weise auf, dass ein positiver Wert von k_1 oder k_2 von der Abscissenachse aus nach oben und ein negativer Wert nach unten eingetragen wird. Die algebraische Summe k der Kräfte k_1 und k_2 wird in dieselbe Figur nach der gleichen Regel eingetragen. Dadurch erhält man drei Kurven für die Kräfte k_1, k_2 und k, welche mit der Abscissenachse bestimmte Flächen einschliessen. Diese Flächen stellen Arbeiten dar. Wenn nun die Bestimmung der Gelenkkräfte bei der Durchführung der Aufgabe richtig gemacht wurde, so muss die von der k-Kurve mit der Abscissenachse begrenzte Fläche derart sein, dass der oberhalb der Abscissenachse liegende Teil dieser Fläche gleich dem unterhalb der Abscissenachse liegende Teil sein muss.

In der vorliegenden Aufgabe wurden die Gelenkkräfte getrennt behandelt und zwar als solche, welche von den äusseren Steuerungsteilen herrühren und als solche, welche von den inneren Steuerungsteilen herrühren. Es wäre nicht notwendig die Kontrolle für die richtige Bestimmung der Gelenkkräfte für die inneren und für die äusseren Steuerungsteile getrennt durchzuführen; es würde genügen, die Kontrolle für die Resultierende der Gelenkkräfte allein zu machen. Um aber die einmal ausgeführte Trennung der Bestimmung der Gelenkkräfte bis zum Ende der Untersuchung aufrecht zu erhalten, wurde die vorstehend erläuterte Kontrolle für die richtige Bestimmung der Gelenkkräfte, herrührend von den äusseren Steuerungsteilen in Fig. 59, und die für die richtige Bestimmung der Gelenkkräfte, herrührend von den inneren Steuerungsteilen in Fig. 60 durchgeführt. Es hat sich dabei auch richtig ergeben, dass die Flächenabschnitte sich jedesmal zu Null ergänzen.

Die Wirkung der Massenkräfte auf die Steuerungsteile und das Kurbelgetriebe ist eine mehrfache. Die Stangen und Hebel werden von diesen Kräften auf Zug, Druck, Biegung oder Torsion beansprucht; d. h. die schon vorhandenen und von äusseren mechanischen Kräften herrührenden spezifischen Spannungen werden durch sie gegebenenfalls noch vergrössert. Es ist z. B. in dem auf der Triebstange gelegenen Gelenkpunkt B, von dem aus ein Teil der Bewegung in das Steuergetriebe eingeleitet wird, für die Kurbelstellung 11, beim Vorwärtsfahren der Lokomotive, nach Tab. 4, die Gelenkkraft $B_k = 2263$ kg. Diese Kraft beansprucht mit ihrer zur Triebstange senkrechten Komponente von 2245 kg die Triebstange auf Biegung. Die Berechnung der Triebstange hätte somit auf kombinierte Biegungs- und Knickungsbeanspruchung zu erfolgen. Die Biegungsbeanspruchung ist keine geringe, da die sie hervorrufende Kraft in der Kurbelstellung 11 bis zu 2245 kg, das ist fast der 10. Teil der 24 000 kg betragenden Kolbenkraft, ansteigt. Ferner vergrössern die trägheitskräfte auch die Zapfendrücke und den Auflagerdruck des Steins in der Kulisse. Im Kurbelzapfen selbst ist z. B. bei der Kurbelstellung 11 nach Tab. 2 der Massendruck $= 1652$ kg. Das gibt bei den gegebenen Abmessungen des Zapfens einen Auflagerdruck von 6 kg f. d. qcm. Verhältnismässig sehr hohe Kräfte treffen nach den Tabellen auf den Gelenkpunkt L, den Stein H und den Kulissendrehpunkt G. In der Kurbelstellung *4* beträgt z. B. die an H angreifende Kraft $H_k = 1968$ kg. Bei einer Auflagerfläche des Steins in der Kulisse von 67,2 qcm wird der spezifische Auflagerdruck bei der Kurbelstellung *4*, der von den bewegten Massen des Steuerungsgetriebes allein herrührt und sich zu dem von der Schieberreibung, der Zapfenreibung, den Gewichten usw. stammenden noch addiert gleich $1968 : 67{,}2 = 29{,}3$ kg f. d. qcm. Eine weitere Folge der von den bewegten Massen herrührenden Kräfte ist noch die, dass die Gelenkkräfte formändernd auf die Stangen und Hebel wirken und damit an ihnen Schwingungen hervorrufen, die um so grösser sein werden, je schwächer die Steuerung konstruiert ist. Diese Schwingungen machen sich nach aussen als ein beständiges Zittern der bewegten Teile bemerkbar.

Schliesslich sei noch gezeigt, wie Geschwindigkeit, Beschleunigung und dynamische Wirkung sich ändern, wenn die Umlaufzahl der Kurbel eine andere wird. Man würde auch für die Bestimmung der Bewegung bei einer höheren Zuggeschwindigkeit die Kurbelzapfengeschwindigkeit und damit auch die Kurbelzapfenbeschleunigung gleich dem Kurbelradius nehmen; d. h. die zeichnerischen Grössen von v und j bleiben dieselben. Nur wird sich ein anderer Masstab ergeben, der durch die Berechnung

der Kurbelzapfengeschwindigkeit und Kurbelzapfenbeschleunigung aus der Zuggeschwindigkeit bestimmt wird. Bezeichnet V in km f. d. Stunde die Zuggeschwindigkeit, so wird die Kurbelzapfengeschwindigkeit:

$$A_v = \frac{V \cdot 1000}{60 \cdot 60} \cdot \frac{2 \cdot R}{D},$$

wobei R der Kurbelradius und D der Triebraddurchmesser ist. Bei zwei verschiedenen Zuggeschwindigkeiten V' und V'' würde das Verhältnis der beiden Kurbelzapfengeschwindigkeiten

$$A'_v : A''_v = V' : V'',$$

d. h. die Geschwindigkeiten am Kurbelzapfen und damit

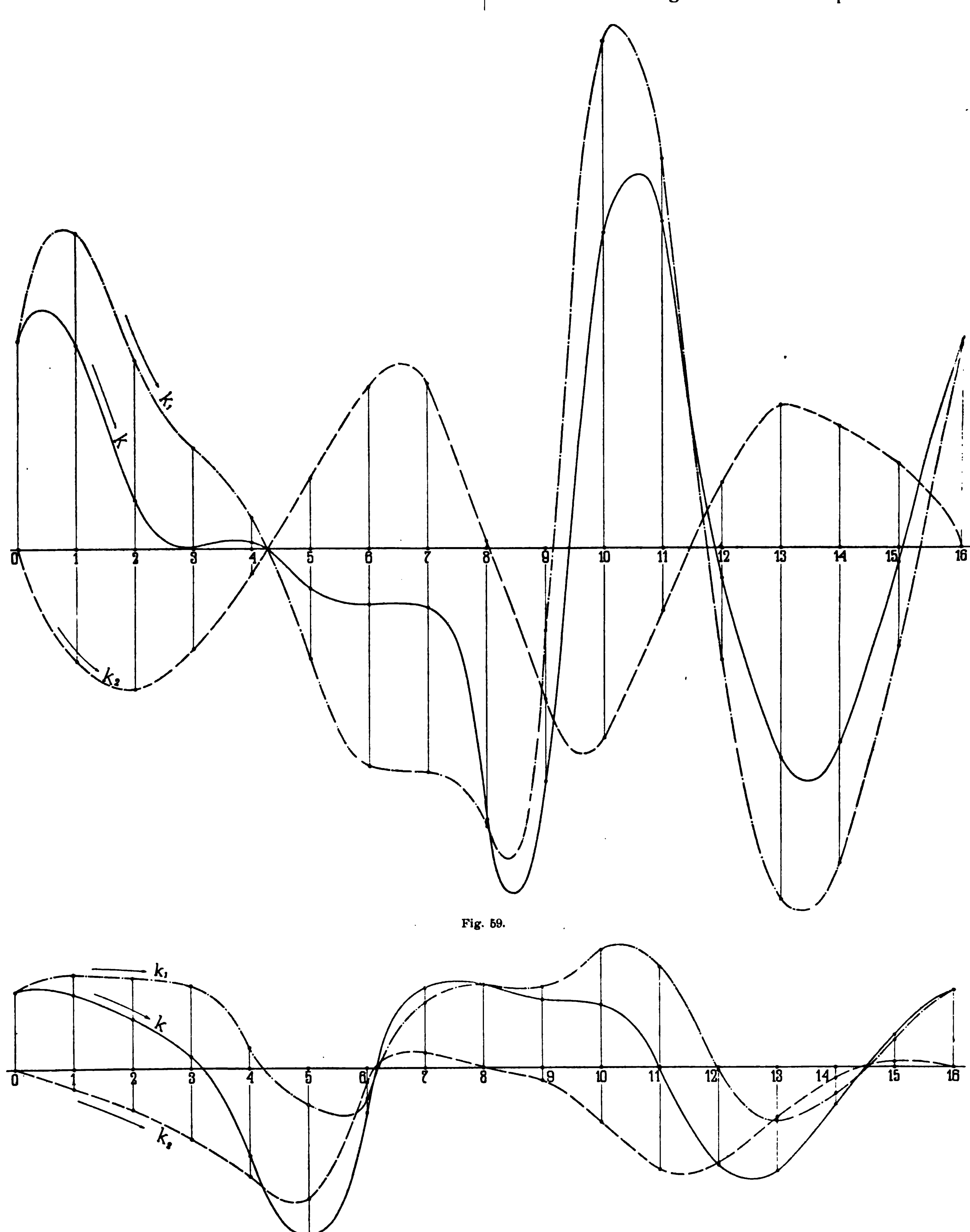


Fig. 59.

Fig. 60.

auch die der übrigen ausgezeichneten Punkte würden sich im gleichen Verhältnis ändern, wie die Zuggeschwindigkeiten.

Die Beschleunigung des Kurbelzapfens wird aus der Formel berechnet:

$$A_j = j_n = \frac{(A_v)^2}{R}.$$

Bei zwei verschiedenen Kurbelzapfengeschwindigkeiten würde danach das Verhältnis der beiden Beschleunigungen

$$A'_j : A''_j = (A'_v)^2 : (A''_v)^2 = (V')^2 : (V'')^2,$$

d. h. die Beschleunigungen des Kurbelzapfens und der übrigen ausgezeichneten Punkte der Steuerung ändern sich mit dem Quadrate der Zuggeschwindigkeiten.

Die Trägheitskräfte sind direkt proportional den Beschleunigungen und ändern sich deshalb im gleichen Verhältnis wie diese.

Steigt z. B. die Zuggeschwindigkeit von 120 km auf 180 km f. d. Stunde, dann werden alle Geschwindigkeiten $180 : 120 = \frac{3}{2} = 1\frac{1}{2}$ mal so gross, und alle Beschleunigungen und Kräfte $180^2 : 120^2 = \frac{9}{4} = 2\frac{1}{4}$ mal so gross. Mit diesen Quotienten müssten demnach alle Tabellenwerte multipliziert werden, damit die Resultate für die Steuerung gelten, wenn der Zug statt mit 120 km mit 180 km i. d. Stunde fährt.

Ausser den in der vorliegenden Aufgabe bestimmten Massenkräften, die allein von Beschleunigung und Verzögerung der bewegten Massen herrühren, sind noch verschiedene andere Kräfte im Steuerungsmechanismus tätig, wie z. B. die Schieberreibung, die Reibung in den Gelenken und in der Stopfbüchse, die Stangengewichte und andere. Von diesen ist besonders die erstere von grösserer Bedeutung, und sie dient in den meisten praktischen Fällen allein zur Berechnung des Steuerungsgestänges auf Festigkeit. Deshalb soll noch gezeigt werden, dass die von der Schieberreibung herrührende Kräfte an den Steuerungsteilen leicht aus den Tabellen bestimmt werden können. Die Schieberreibung wirkt am Punkte M in derselben Richtung wie die Massenkraft des Schiebers und der Schieberstange, deren Verteilung auf die Steuerungsgelenke schon bestimmt ist und in den Tabellen als die Kraft k'' eingetragen ist. Ist nun k''_m die Trägheitskraft der Massen am Punkte M von Schieber und Schieberstangen für eine bestimmte Kurbelstellnng, und k_r die von der Reibung des Schiebers herrührende Kraft bei der gleichen Kurbelstellung, dann würden alle Tabellenwerte von k'' bei dieser Kurbelstellung mit dem Quotienten $k_r : k''_m$ zu multiplizieren sein, damit man die Kraft an dem betreffenden Gelenkpunkt erhält, die die Schieberreibung an ihm hervorruft. Der Quotient $k_r : k''_m$ wird für jede Kurbelstellung einen anderen Wert haben, da sich k_r sowohl, als auch k''_m unabhängig von einander ändern. Sammelt man diese so gefundenen Werte in Tabellen, so erhält man ein Bild über den Verlauf der Kräfte, die die Schieberreibung auf die Steuerungsgelenke ausübt.

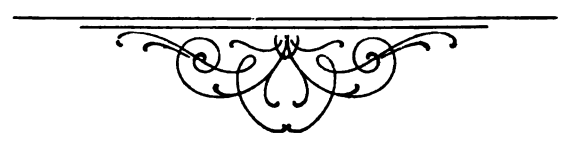


Tabelle 2. *Kurbelzapfen A.*

Kurbelstellung	Oberste Steinstellung						Unterste Steinstellung					
	v	j	j_t	k'	k''	k	v	j	j_t	k'	k''	k
0	9,60	323,1	0	534	94	589	9,60	323,1	0	536	62	506
1	„	„	„	836	128	944	„	„	„	842	0	842
2	„	„	„	786	161	932	„	„	„	798	39	834
3	„	„	„	713	239	946	„	„	„	724	89	811
4	„	„	„	788	347	1135	„	„	„	762	175	936
5	„	„	„	871	290	1157	„	„	„	819	251	1069
6	„	„	„	767	52	815	„	„	„	747	234	956
7	„	„	„	656	84	597	„	„	„	658	152	778
8	„	„	„	602	99	549	„	„	„	601	110	670
9	„	„	„	279	102	293	„	„	„	262	75	260
10	„	„	„	823	192	1015	„	„	„	966	59	1023
11	„	„	„	1339	313	1652	„	„	„	1333	210	1542
12	„	„	„	1299	304	1599	„	„	„	1242	260	1500
13	„	„	„	1010	174	1184	„	„	„	956	238	1059
14	„	„	„	668	46	713	„	„	„	628	202	830
15	„	„	„	373	35	352	„	„	„	367	145	475

Tabelle 3. *Kreuzkopf R.*

Kurbelstellung	Oberste Steinstellung						Unterste Steinstellung					
	v	j	j_t	k'	k''	k	v	j	j_t	k'	k''	k
0	0	269,8	+ 269,8	93	34	127	0	269,8	+ 269,8	94	22	72
1	3,09	258,3	+ 258,3	176	46	222	3,09	258,3	+ 258,3	220	0	220
2	5,94	224,3	+ 224,3	237	59	296	5,94	224,3	+ 224,3	245	14	260
3	8,24	160,5	+ 160,5	266	88	354	8,24	160,5	+ 160,5	274	33	307
4	9,53	57,4	+ 57,4	291	128	419	9,53	57,4	+ 57,4	291	64	355
5	9,42	79,4	— 79,4	305	101	406	9,42	79,4	— 79,4	300	93	393
6	7,66	220,4	— 220,4	270	19	289	7,66	220,4	— 220,4	264	86	350
7	4,36	330,8	— 330,8	189	31	158	4,36	330,8	— 330,8	189	56	245
8	0,18	377,3	— 377,3	126	36	89	0,18	377,3	— 377,3	126	40	166
9	4,09	341,2	+ 341,2	8	37	45	4,09	341,2	+ 341,2	22	27	6
10	7,54	236,9	+ 236,9	303	71	374	7,54	236,9	+ 236,9	194	22	216
11	9,47	91,8	+ 91,8	500	116	616	9,47	91,8	+ 91,8	496	77	573
12	9,70	51,0	— 51,0	488	113	601	9,70	51,0	— 51,0	463	96	558
13	8,35	164,2	— 164,2	377	65	442	8,35	164,2	— 164,2	356	90	446
14	6,03	231,0	— 231,0	238	17	255	6,03	231,0	— 231,0	247	74	322
15	3,11	263,2	— 263,2	84	13	71	3,11	263,2	— 263,2	84	53	137

Tabelle 4. *Punkt B.*

Kurbelstellung	Oberste Steinstellung						Unterste Steinstellung					
	v	j	j_t	k'	k''	k	v	j	j_t	k'	k''	k
0	7,00	308,1	— 4,5	579	128	666	7,00	308,1	— 4,5	582	83	535
1	7,35	302,9	+ 54,9	1008	174	1160	7,35	302,9	+ 54,9	1013	0	1013
2	8,15	283,9	+ 80,5	995	219	1202	8,15	283,9	+ 80,5	1016	54	1067
3	9,06	257,6	+ 42,6	952	327	1274	9,06	257,6	+ 42,6	964	122	1085
4	9,59	237,6	+ 17,7	1079	475	1553	9,59	237,6	+ 17,7	1043	239	1282
5	9,43	244,2	— 64,8	1889	396	1582	9,43	244,2	— 64,8	1118	344	1424
6	8,70	279,6	— 87,1	1023	71	1090	8,70	279,6	— 87,1	994	320	1303
7	7,61	319,2	— 81,4	811	115	698	7,61	319,2	— 81,4	811	208	992
8	7,03	337,8	— 8,4	682	135	594	7,03	337,8	— 8,4	683	150	795
9	7,45	324,2	+ 75,7	279	139	310	7,45	324,2	+ 75,7	262	102	262
10	8,51	286,8	+ 92,5	1126	263	1389	8,51	286,8	+ 92,5	1160	80	1240
11	9,37	247,6	+ 51,2	1838	430	2263	9,37	247,6	+ 51,2	1829	288	2116
12	9,60	235,8	— 10,0	1783	417	2195	9,60	235,8	— 10,0	1704	355	2058
13	9,18	254,2	— 61,7	1386	239	1624	9,18	254,2	— 61,7	1312	319	1631
14	8,26	280,9	— 81,9	905	63	967	8,26	280,9	— 81,9	874	277	1148
15	7,41	301,1	— 60,5	436	48	400	7,41	301,1	— 60,5	430	198	596

Tabelle 5. *Punkt C.*

Kurbel-stellung	Oberste Steinstellung						Unterste Steinstellung					
	v	j	j_t	k'	k''	k	v	j	j_t	k'	k''	k
0	7,46	185,9	— 171,0	173	53	129	7,46	185,9	— 171,0	171	34	203
1	4,75	270,5	— 268,7	116	71	147	4,75	270,5	— 268,7	115	0	115
2	1,91	198,2	— 197,9	110	70	165	1,91	198,2	— 197,9	116	17	128
3	0,24	93,4	— 93,4	83	65	143	0,24	93,4	— 93,4	86	24	108
4	0,47	41,7	+ 41,7	58	29	87	0,47	41,7	+ 41,7	54	14	68
5	0,95	51,0	+ 50,8	27	31	52	0,95	51,0	+ 50,8	23	27	43
6	1,85	108,4	+ 108,2	71	16	83	1,85	108,4	+ 108,2	66	69	126
7	3,66	207,0	+ 205,9	87	38	91	3,66	207,0	+ 205,9	88	69	118
8	6,56	281,8	+ 276,2	123	54	149	6,56	281,8	+ 276,2	132	59	24
9	9,25	186,1	+ 147,8	119	52	166	9,25	186,1	+ 147,8	131	38	99
10	8,94	248,5	— 224,9	250	67	318	8,94	248,5	— 224,9	270	21	290
11	4,59	463,0	— 462,1	287	45	321	4,59	463,0	— 462,1	286	31	309
12	0,81	431,7	+ 431,5	183	20	184	0,81	431,7	+ 431,5	183	15	184
13	5,08	297,0	+ 294,8	247	40	283	5,08	297,0	+ 294,8	234	54	281
14	7,61	165,3	+ 146,2	327	15	341	7,61	165,3	+ 146,2	319	74	392
15	8,48	95,0	— 3,9	323	18	305	8,48	95,0	— 3,9	330	67	398

Tabelle 6. *Punkt D.*

Kurbel-stellung	Oberste Steinstellung						Unterste Steinstellung					
	v	j	j_t	k'	k''	k	v	j	j_t	k'	k''	k
0	—	—	—	92	53	48	—	—	—	90	34	122
1	—	—	—	225	71	294	—	—	—	226	0	226
2	—	—	—	208	70	276	—	—	—	217	17	234
3	—	—	—	119	65	183	—	—	—	122	24	145
4	—	—	—	65	29	99	—	—	—	63	14	77
5	—	—	—	17	31	47	—	—	—	14	27	38
6	—	—	—	80	16	94	—	—	—	74	69	142
7	—	—	—	108	38	75	—	—	—	106	69	172
8	—	—	—	159	54	111	—	—	—	161	59	217
9	—	—	—	62	52	31	—	—	—	57	38	91
10	—	—	—	305	67	371	—	—	—	322	21	342
11	—	—	—	400	45	444	—	—	—	400	31	430
12	—	—	—	130	20	117	—	—	—	131	15	120
13	—	—	—	245	40	285	—	—	—	227	54	280
14	—	—	—	407	15	421	—	—	—	397	74	471
15	—	—	—	380	18	363	—	—	—	387	69	455

Tabelle 7. *Punkt E.*

Kurbel-stellung	Oberste Steinstellung						Unterste Steinstellung					
	v	j	j_t	k'	k''	k	v	j	j_t	k'	k''	k
0	7,16	227,6	— 60,5	204	135	264	7,16	227,6	— 60,5	206	86	86
1	6,32	236,7	— 74,4	375	174	531	6,32	236,7	— 74,4	384	0	384
2	5,75	221,3	— 19,7	465	213	672	5,75	221,3	— 19,7	492	52	543
3	5,80	189,1	+ 22,0	592	320	910	5,80	189,1	+ 22,0	604	119	723
4	6,05	165,7	+ 12,5	795	474	1268	6,05	165,7	+ 12,5	760	237	997
5	6,03	173,2	— 15,4	912	402	1312	6,03	173,2	— 15,4	839	349	1187
6	5,85	207,0	— 15,9	687	77	761	5,85	207,0	— 15,9	657	338	991
7	5,93	239,2	+ 44,2	334	127	228	5,93	239,2	+ 44,2	333	229	548
8	6,85	225,1	+ 103,2	144	148	155	6,85	225,1	+ 103,2	141	164	254
9	7,77	153,7	+ 37,6	166	143	302	7,77	153,7	+ 37,6	204	105	111
10	7,37	232,0	— 102,7	599	255	854	7,37	232,0	— 102,7	644	78	722
11	6,16	323,3	— 63,9	932	418	1348	6,16	323,3	— 63,9	928	280	1207
12	6,24	302,0	+ 58,7	983	422	1403	6,24	302,0	+ 58,7	910	361	1266
13	7,02	253,9	+ 65,3	867	253	1119	7,02	253,9	+ 65,3	786	339	1124
14	7,54	229,7	+ 27,0	645	68	711	7,54	229,7	+ 27,0	612	300	910
15	7,62	224,7	— 15,0	365	52	318	7,62	224,7	— 15,0	369	213	571

Tabelle 8. *Punkt F.*

Kurbelstellung	Oberste Steinstellung						Unterste Steinstellung					
	v	j	j_t	k'	k''	k	v	j	j_t	k'	k''	k
0	7,05	97,3	— 12,9	155	135	191	7,05	97,3	— 12,9	155	86	186
1	6,34	127,9	— 100,9	171	174	299	6,34	127,9	— 100,9	180	0	180
2	4,93	148,7	— 141,3	179	213	377	4,93	148,7	— 141,3	204	52	252
3	3,02	185,7	— 184,8	233	320	551	3,02	185,7	— 184,8	243	119	362
4	0,55	244,4	— 244,4	327	474	799	0,55	244,4	— 244,4	292	237	528
5	2,51	268,7	+ 268.2	367	402	760	2,51	268,7	+ 268,2	303	349	640
6	5,35	202,2	+ 194,5	228	77	298	5,35	202,2	+ 194,5	203	338	523
7	6,82	110,9	+ 62,8	75	127	53	6,82	110,9	+ 62,8	71	229	281
8	7,02	97,0	— 12,0	17	148	159	7,02	97,0	— 12,0	26	164	143
9	6,60	103,6	— 59,6	45	143	185	6,60	103,6	— 59,6	83	105	31
10	5,32	179,6	— 171,2	174	255	429	5,32	179,6	— 171,2	220	78	299
11	2,81	245,1	— 244,4	299	418	714	2,81	245.1	— 244,4	300	280	578
12	0,10	242,4	+ 242,4	350	422	767	0,10	242,4	+ 242,4	284	361	637
13	2,79	217,4	+ 217,0	317	253	568	2,79	217,4	+ 217,0	245	339	580
14	5,05	177,1	+ 169,8	248	68	320	5,05	177,1	+ 169,8	221	300	520
15	6,59	123,8	+ 90,9	183	52	142	6,59	123,8	+ 90,9	191	213	389

Tabelle 9. *Punkt G.*

Kurbelstellung	Oberste Steinstellung						Unterste Steinstellung					
	v	j	j_t	k'	k''	k	v	j	j_t	k'	k''	k
0	—	—	—	191	473	305	—	—	—	29	363	140
1	—	—	—	112	658	572	—	—	—	185	0	185
2	—	—	—	49	824	855	—	—	—	386	211	470
3	—	—	—	300	1224	1524	—	—	—	339	440	779
4	—	—	—	662	1764	2424	—	—	—	263	795	1051
5	—	—	—	871	1480	2348	—	—	—	196	1110	1270
6	—	—	—	513	288	800	—	—	—	104	1014	1064
7	—	—	—	115	499	384	—	—	—	43	746	788
8	—	—	—	37	592	624	—	—	—	23	564	573
9	—	—	—	88	572	656	—	—	—	77	401	343
10	—	—	—	221	960	1180	—	—	—	319	314	633
11	—	—	—	298	1380	1677	—	—	—	557	1127	1690
12	—	—	—	346	1249	1591	—	—	—	579	1440	2013
13	—	—	—	300	698	1495	—	—	—	440	1341	1778
14	—	—	—	254	193	447	—	—	—	272	1201	473
15	—	—	—	247	166	90	—	—	—	86	880	120

Tabelle 10. *Stein H.*

Kurbelstellung	Oberste Steinstellung						Unterste Steinstellung					
	v	j	j_t	k'	k''	k	v	j	j_t	k'	k''	k
0	1,85	9,5	— 4,5	49	486	525	1,84	9,3	— 4,3	49	311	362
1	1,72	17,0	— 15,6	113	647	759	1,71	24,0	— 22,9	164	0	164
2	1,47	29,1	— 28,7	138	773	910	1,35	35,4	— 34,7	250	194	444
3	1,01	53,5	— 54,1	278	1097	1374	0,85	50,6	— 5,0	315	419	734
4	0,19	86,9	— 86,6	457	1512	1968	0,15	69,2	— 69,2	361	795	1156
5	0,87	85,0	+ 85,0	540	1229	1769	0,70	73,5	+ 73,5	342	1107	1449
6	1,62	41.3	+ 40,4	287	235	522	1,45	49,2	+ 49,0	197	1060	1257
7	1,85	13,1	+ 4,7	85	420	335	1,78	17,0	+ 15,4	63	717	780
8	1,85	8,3	— 2,8	29	511	488	1,85	8,0	— 1,4	27	568	541
9	1,80	9,4	— 5,5	6	516	510	1,79	15,0	— 12,0	139	386	248
10	1,61	36,7	— 36,2	144	911	1055	1,51	44,0	— 43,3	334	286	620
11	0,95	76,4	— 76,4	376	1379	1755	0,82	69,5	— 69,4	413	982	1395
12	0,04	85,0	+ 82,5	518	1312	1829	0,03	71,3	+ 61,0	354	1198	1552
13	0,94	65,5	+ 65,5	456	760	1216	0,81	59,2	+ 59,0	258	1193	1451
14	1,53	36,6	+ 35,9	289	211	499	1,41	42,6	+ 42,4	214	981	1195
15	1,80	16,1	+ 13,5	116	177	62	1,75	26,4	+ 25,4	157	735	892

Tabelle 11. *Punkt I.*

Kurbelstellung	Obere Steinstellung						Unterste Steinstellung					
	v	j	j_t	k'	k''	k	v	j	j_t	k'	k''	k
0	1,85	12,8	— 4,5	5	0	5	1,82	12,7	— 4,8	4	0	4
1	1,72	18,1	— 15,2	15	88	102	1,71	24.7	— 23,1	23	0	23
2	1,48	29,2	— 28,2	33	194	226	1,35	35,6	— 35,1	34	47	80
3	1,02	54,2	— 54,2	93	364	458	0.86	50,8	— 50,6	86	135	221
4	0.19	87,5	— 87,5	189	558	748	0,15	70,7	— 70,7	101	285	385
5	0,88	85,6	+ 85,6	184	427	611	0,71	73,2	+ 73,2	79	370	448
6	1,63	41,2	+ 40,2	71	63	133	1,45	49,2	+ 49,0	36	283	318
7	1,83	13,1	+ 5,0	3	61	58	1,78	18.8	+ 15,4	8	105	112
8	1,85	12,3	— 2,8	3	3	6	1,84	12,2	— 1,4	2	2	5
9	1,80	12,5	— 5,1	5	66	70	1,79	16,3	— 11,3	29	52	81
10	1,62	36,9	— 35,8	33	226	194	1.51	43,3	— 42,4	104	75	179
11	0,96	76,8	— 76,7	118	452	565	0,83	69,9	— 70,0	151	345	496
12	0,04	85,8	+ 85,8	172	462	633	0,03	72 1	+ 72,1	129	454	582
13	0,95	65,9	+ 65,8	136	248	383	0,82	59,4	+ 59,2	86	379	464
14	1,54	36,6	+ 35,6	85	53	110	1,42	42,2	+ 41,5	59	258	316
15	1,80	17,3	+ 13,1	4	24	21	1,75	27,4	+ 25,2	27	103	130

Tabelle 12. *Punkt K.*

Kurbelstellung	Oberste Steinstellung						Unterste Steinstellung					
	v	j	j_t	k'	k''	k	v	j	j_t	k'	k''	k
0	—	—	—	8	0	8	—	—	—	7	0	7
1	—	—	—	13	88	101	—	—	—	26	0	26
2	—	—	—	35	194	229	—	—	—	58	47	105
3	—	—	—	105	364	468	—	—	—	88	135	224
4	—	—	—	212	558	752	—	—	—	103	285	387
5	—	—	—	203	427	631	—	—	—	81	370	451
6	—	—	—	76	63	138	—	—	—	39	283	321
7	—	—	—	1	61	61	—	—	—	11	105	116
8	—	—	—	6	3	9	—	—	—	5	2	8
9	—	—	—	7	66	74	—	—	—	33	52	85
10	—	—	—	3	226	196	—	—	—	108	75	183
11	—	—	—	132	452	581	—	—	—	157	345	502
12	—	—	—	190	462	632	—	—	—	134	454	587
13	—	—	—	148	248	396	—	—	—	90	379	469
14	—	—	—	60	53	113	—	—	—	63	258	321
15	—	—	—	2	24	23	—	—	—	31	103	134

Tabelle 13. *Punkt L.*

Kurbelstellung	Oberste Steinstellung						Unterste Steinstellung					
	v	j	j_t	k'	k''	k	v	j	j_t	k'	k''	k
0	1,87	17,3	— 6,8	29	486	512	1,89	17,5	— 7,0	28	312	289
1	1,70	24,5	— 17,9	41	632	667	1,67	26,3	— 24,5	59	0	59
2	1,45	30,3	— 27,8	15	712	709	1,33	35,1	— 34,7	100	196	296
3	1,00	53,6	— 53,3	18	943	945	0,83	49,4	— 49,2	100	423	523
4	0,23	85,6	— 74,1	40	1249	1280	0,17	68,9	— 58,0	66	804	870
5	0,85	85,1	+ 83,8	88	1035	1127	0,69	71,6	+ 70,5	9	116	1125
6	1,61	42,3	+ 41,9	120	213	334	1,43	50,8	+ 48,7	25	1069	1051
7	1,85	10,5	+ 5,2	58	408	349	1,80	25,4	+ 18,8	38	722	704
8	1,85	20,3	— 2,4	38	511	479	1,91	21,0	+ 4,5	41	569	534
9	1,80	18,7	— 3,1	34	506	477	1,92	13,8	— 9,3	85	383	297
10	1,65	36,4	— 34,4	24	847	823	1,62	48,1	— 47,8	129	281	406
11	1,00	77,4	— 76,8	12	1205	1218	0,85	77,7	— 76,4	95	955	1034
12	0,08	88,2	+ 86,2	75	1119	1194	0,15	78,0	+ 64,6	51	1164	1177
13	0,95	68,5	+ 68,2	116	664	779	0,90	61,6	+ 59,9	33	1063	1051
14	1,57	37,2	+ 37,2	111	195	306	1,51	46,5	+ 44,0	18	963	976
15	1,83	14,1	+ 12,2	55	173	118	1,81	28,5	+ 21,8	49	652	777

Tabelle 14. *Punkt M.*

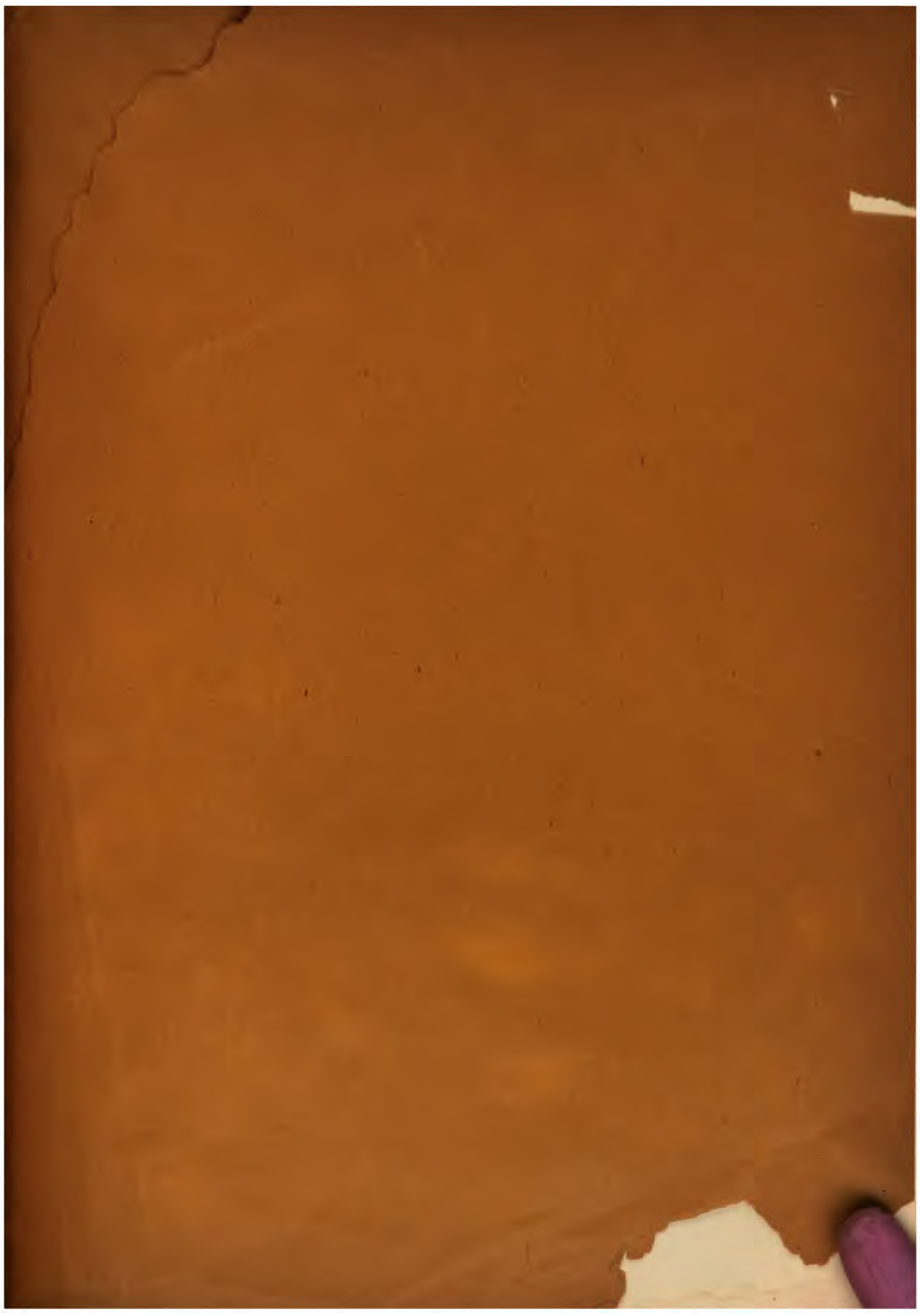
Kurbel-stellung	Oberste Steinstellung						Unterste Steinstellung						Mittlere Steinstellung		
	v	j	j_t	k'	k''	k	v	j	j_t	k'	k''	k	v	j	j_t
0	2,09	39,8	— 39,8	205	433	479	2,11	25,2	+ 25,2	236	277	364	0,00	32,6	+ 32.6
1	1,53	51,2	— 51,2	241	559	608	2,24	0,0	0,0	94	0	94	0,37	29,5	+ 29.5
2	0,91	57,6	— 57,6	106	629	639	2,13	16,1	— 16.1	25	173	175	0,68	23,9	+ 23,9
3	0,12	76,0	— 76,0	30	829	829	1,85	34,4	— 34,4	136	376	399	0,94	18,4	+ 18,4
4	0,88	101,5	+ 101,5	120	1108	1116	1,30	64,8	— 64,8	200	708	736	1,11	9,8	+ 9,8
5	2,05	85,0	+ 85,0	188	928	996	0,39	89,8	— 89,8	119	984	991	1,11	8,1	— 8,1
6	2,69	17,5	+ 17,5	118	192	225	0.65	85,0	+ 85,0	77	929	930	0,90	28,2	— 28,2
7	2,54	33,4	— 33,4	75	365	373	1,50	57,6	+ 57,6	168	632	654	0,50	40,0	— 40,0
8	2,05	42.4	— 42,4	171	463	493	2,08	45,0	+ 45,0	187	491	524	0,02	42,9	— 42,9
9	1,51	41,9	— 41,9	169	457	488	2,57	30,0	+ 30,0	60	328	333	0,48	41,3	+ 41,3
10	0,96	69,7	— 69,7	62	761	763	2,66	22,4	— 22,4	183	242	304	0,92	30,6	+ 30,6
11	0,03	98,5	+ 98,5	101	1075	1080	2,06	75,7	— 75,7	293	827	877	1.15	7,8	+ 7.8
12	1,18	88,8	+ 88,8	209	969	993	1,04	92,9	— 92,9	248	1015	1046	1,12	11,6	— 11,6
13	2,03	54,4	+ 54,4	185	594	622	0,00	85,3	+ 85,3	90	932	936	0,92	19,6	— 19,6
14	2,42	16,0	+ 16,0	79	175	192	0,95	76 7	+ 76,7	88	838	843	0,66	24,4	— 24,4
15	2,40	14,0	— 14,0	57	153	161	1,65	57,9	+ 57,9	233	633	675	0,37	29,4	— 29,4

Tabelle 15. *Punkt N.*

Kurbel-stellung	Oberste Steinstellung						Unterste Steinstellung						Mittlere Steinstellung		
	v	j	j_t	k'	k''	k	v	j	j_t	k'	k''	k	v	j	j_t
0	1,16	226,5	— 194,1	212	57	268	1,17	324,7	+ 185,0	227	27	254	0,00	334,9	+ 334,7
1	3,33	323,3	+ 311,8	219	75	295	4,01	248,3	+ 227,9	158	0	158	3,67	280,9	+ 279,8
2	6,55	222,7	+ 222,4	130	80	209	6,30	209,3	+ 180,5	130	19	111	6,44	205,4	+ 193,0
3	8,56	147,2	+ 124,5	61	100	160	8,18	211,8	+ 146,5	101	42	62	8,34	180,0	+ 130,8
4	9,49	148,3	+ 42,6	27	130	135	9,60	187,3	+ 86,4	72	84	40	9,49	175,0	+ 68,2
5	9,53	203.8	— 47,2	65	108	111	9,82	142,8	— 60,1	27	117	137	9,68	171,6	— 46,7
6	8,22	264,4	— 187,7	134	22	113	8,03	247,6	— 244,9	133	123	256	8,17	264,6	— 195,7
7	5,04	360,5	— 337,2	236	40	276	4,42	350,3	— 343,7	207	89	296	4,69	359,8	— 357,8
8	1,06	403,6	— 202,9	245	48	293	0.97	401,3	+ 66,9	243	64	307	0,19	404.3	— 388,2
9	4,13	367,0	+ 360,7	222	48	270	4,78	371,2	+ 346,7	221	45	266	4,39	370,5	+ 368,9
10	7,85	260,3	+ 253,9	145	85	230	8,08	277,8	+ 207,0	145	31	115	8,05	263,7	+ 239,0
11	9,90	142,2	+ 81,2	34	126	156	9,54	205,4	+ 52,8	66	99	54	9,76	182,5	+ 57,4
12	9,80	184,6	— 81,4	74	114	60	9,66	179,8	— 38,5	33	112	96	9,66	179,1	— 50,8
13	8,32	224,0	— 154,0	110	69	47	8,65	150,6	— 125,8	62	108	162	8,42	188,2	— 133,3
14	6.40	222,2	— 179,1	114	20	94	6,56	232,4	— 232,4	130	96	226	6,51	211,8	— 192,3
15	4,04	249,4	— 222,2	166	19	184	3,34	327,6	— 315,4	207	78	283	3,70	274,3	— 270,3

Tabelle 16. *Punkt O.*

Kurbel-stellung	Oberste Steinstellung						Unterste Steinstellung					
	v	j	j_t	k'	k''	k	v	j	j_t	k'	k''	k
0	0,00	269,8	+ 269,8	418	57	475	0,00	269,8	+ 269,8	431	27	457
1	3,09	258,3	+ 258,3	418	75	494	3,09	258,3	+ 258,3	318	0	318
2	5,94	224,3	+ 224,3	270	80	351	5,94	224,3	+ 224,3	245	19	226
5	8,24	160,5	+ 160,5	139	100	239	8,24	160,5	+ 160,5	184	42	142
4	9,53	57,4	+ 57,4	32	130	162	9,53	57,4	+ 57,4	108	85	128
5	9,42	79,4	— 79,4	9	108	79	9,42	79,4	— 79,4	55	117	171
6	7,66	220,4	— 220,4	25	22	228	7,66	220,4	— 220,4	266	123	389
7	4,36	330,8	— 330,8	435	40	475	4,36	330,8	— 330,8	405	81	482
8	0,18	377,3	— 377,3	472	48	520	0,18	377,3	— 377,3	469	64	533
9	4,09	341,2	+ 341,2	380	48	428	4,09	341,2	+ 341,2	427	45	471
10	7,54	236,9	+ 236.9	289	85	374	7,54	236,9	+ 236,9	272	31	242
11	9,47	91,8	+ 91,8	76	126	202	9,47	91,8	+ 91,8	97	99	16
12	9,70	51,0	— 51,0	78	114	42	9,70	51,0	— 51,0	31	112	87
13	8,35	164,2	— 164,2	195	70	126	8,35	164,2	— 164,2	132	106	221
14	6,03	231.0	— 231,0	231	20	211	6,03	231,0	— 231,0	276	96	372
15	3,11	263,2	— 263,2	307	19	326	3,11	263,2	— 263,2	412	78	489



Druck von Franz Weber
Berlin W. 66, Mauerstr. 80.

